



## **TUGAS AKHIR - SF 141501**

**ESTIMASI MOMEN TENSOR, POLA BIDANG SESAR DAN MEKANISME  
FOKUS GEMPA BUMI KUMAMOTO JEPANG PADA TAHUN 2016  
BERDASARKAN INVERSI WAVEFORM TIGA KOMPONEN**

**ZUMROTUS SAADAH ABAZ  
NRP 1112100049**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U**

**Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



## **FINAL PROJECT - SF 141501**

**MOMENT TENSOR, FAULT PLANE AND FOCAL MECHANISM  
ESTIMATION OF 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE USING  
THREE COMPONENT WAVEFORM INVERSION**

**ZUMROTUS SAADAH ABAZ  
NRP 1112100049**

**Advisor  
Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U**

**Department of Physics  
Faculty of Mathematics and Natural Sciences  
Institute of Technology Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**

## LEMBAR PENGESAHAN

# ESTIMASI MOMEN TENSOR, POLA BIDANG SESAR DAN MEKANISME FOKUS GEMPA BUMI KUMAMOTO JEPANG PADA TAHUN 2016 BERDASARKAN INVERSI WAVEFORM TIGA KOMPONEN

## TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Sains  
pada

Bidang Fisika Bumi  
Program Studi S-1 Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ZUMROTUS SAADAH ABAZ**  
**1112100049**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

**Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U**  
NIP. 19620802 198701 1.001



(.....)

Surabaya, Juni 2016

**ESTIMASI MOMEN TENSOR, POLA BIDANG  
SESAAR DAN MEKANISME FOKUS GEMPA BUMI  
KUMAMOTO JEPANG PADA TAHUN 2016  
BERDASARKAN INVERSI *WAVEFORM* TIGA  
KOMPONEN**

**Nama** : Zumrotus Saadah Abaz  
**NRP** : 1112100049  
**Jurusan** : Fisika, FMIPA-ITS  
**Pembimbing** : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa,  
**SU**

**Abstrak**

*Gempa Bumi 7.3 SR pada tahun 2016 terjadi di Kumamoto Jepang dan telah dilakukan analisa momen tensor dan pola bidang sesar dari data gempa bumi foreshock dan aftershock dengan magnitude diatas 5.8 SR dari gempa tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan momen tensor, pola bidang sesar dan slip dari gempa bumi Kumamoto berdasarkan inversi waveform tiga komponen dengan metode iterasi dekonvolusi menggunakan program ISOLA-GUI. Dari penelitian ini diketahui jika gempa Kumamoto tahun 2016 didominasi oleh sesar mendatar (strike-slip fault). Juga didapatkan sesar normal, sesar naik akibat geologi regional Kumamoto yang dinamis dan kompleks. Rentang nilai Momen tensor yang didapatkan dalam penelitian ini yaitu  $M_{11} = 0.220 \exp17$  sampai  $2.226 \exp19$ ,  $M_{22} = 0.122 \exp17$  sampai  $1.132 \exp19$ ,  $M_{33} = 0.080 \exp17$  sampai  $0.152 \exp19$ ,  $M_{31} = 0.061 \exp17$  sampai  $0.045 \exp19$ ,  $M_{32} = 0.148 \exp17$  sampai  $0.757 \exp19$ , dan  $M_{12} = 0.018 \exp17$  sampai  $0.214 \exp19$ . Sedangkan besarnya slip maksimum yang dihasilkan mencapai 236 meter dengan rata-rata slip sepanjang 60 meter.*

**Kata kunci:** *crustal fault, focal mechanism, gempa Kumamoto dan momen tensor.*

# **MOMENT TENSOR, FAULT PLANE AND FOCAL MECHANISM ESTIMATION OF 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE USING THREE COMPONENT WAVEFORM INVERSION**

**Nama** : Zumrotus Saadah Abaz  
**NRP** : 1112100049  
**Jurusan** : Fisika, FMIPA-ITS  
**Pembimbing** : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa,  
**SU**

## **Abstract**

*A 7.3 Mw earthquake occurred in Kumamoto Japan on 2016. Analysis of moment tensor and fault plane from foreshock and aftershock earthquakes with magnitude above 5.8 Mw have been done on this research. Obtaining moment tensor, fault plane and slip of Kumamoto earthquake by three component waveform inversion using iteration deconvolution method of ISOLA-GUI program were the objection of this research. The 2016 Kumamoto earthquakes known that they were mostly caused by strike slip fault. But it also obtained normal fault and reverse fault because of the dynamic and complex of Kumamoto's geology background. The range value of moment tensor from this research were  $M_{11} = 0.220 \exp17$  until  $2.226 \exp19$ ,  $M_{22} = 0.122 \exp17$  until  $1.132 \exp19$ ,  $M_{33} = 0.080 \exp17$  until  $0.152 \exp19$ ,  $M_{31} = 0.061 \exp17$  until  $0.045 \exp19$ ,  $M_{32} = 0.148 \exp17$  until  $0.757 \exp19$ , and  $M_{12} = 0.018 \exp17$  until  $0.214 \exp19$ . The maximum value of slip is 236 meters by the mean value is 60 meters long.*

**Keywords** : crustal fault, focal mechanism, Kumamoto earthquakes and moment tensor.

## DAFTAR ISI

|   |             |
|---|-------------|
| <b>HALAMAN JUDUL.....</b>               | <b>i</b>    |
| <b><i>COVER PAGE</i> .....</b>          | <b>iii</b>  |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>          | <b>v</b>    |
| <b>ABSTRAK.....</b>                     | <b>vii</b>  |
| <b><i>ABSTRACT</i> .....</b>            | <b>ix</b>   |
| <b>KATA PENGANTAR .....</b>             | <b>xi</b>   |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                  | <b>xiii</b> |
| <b>DAFTAR GAMBAR .....</b>              | <b>xvii</b> |
| <b>DAFTAR TABEL.....</b>                | <b>xxi</b>  |
| <b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>           | <b>1</b>    |
| 1.1 Latar Belakang .....                | 1           |
| 1.2 Rumusan Masalah.....                | 3           |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....             | 3           |
| 1.4 Batasan Masalah.....                | 4           |
| 1.5 Manfaat Penelitian .....            | 4           |
| 1.6 Sistematika Penulisan Laporan ..... | 4           |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>     | <b>7</b>    |
| 2.1 Gempa Bumi .....                    | 7           |
| 2.2 Penjalaran Gelombang Seismik.....   | 10          |
| 2.2.1 Tipe-Tipe Gelombang Seismik.....  | 11          |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.3 <i>Seismic Moment Tensor</i> .....         | 14        |
| 2.4 Inversi <i>Waveform</i> Tiga Komponen..... | 16        |
| 2.5 Fungsi <i>Green</i> .....                  | 18        |
| 2.6 Mekanisme Fokus.....                       | 20        |
| 2.6.1 Geometri Patahan.....                    | 21        |
| 2.7 Program ISOLA-GUI.....                     | 23        |
| 2.8 Tatanan Tektonik Jepang.....               | 24        |
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>     | <b>29</b> |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian .....              | 29        |
| 3.2 Penentuan Lokasi Penelitian .....          | 30        |
| 3.3 Konversi Waveform dalam format SAC.....    | 30        |
| 3.4 Proses Pengolahan Data .....               | 31        |
| 3.4.1 Pengolahan Data dalam ISOLA-GUI.....     | 31        |
| 3.4.2 Perhitungan Data .....                   | 42        |
| 3.5 Analisa Data dan Pembahasan.....           | 43        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>       | <b>45</b> |
| 4.1 Analisis Data .....                        | 45        |
| 4.1.1 Data Penelitian.....                     | 45        |
| 4.2 Hasil Pengolahan .....                     | 47        |
| 4.2.1 Hasil Momen Skalar .....                 | 47        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2.2 Hasil Momen Tensor.....             | 49        |
| 4.2.3 Hasil Mekanisme Fokus Gempa .....   | 50        |
| 4.2.4 Hasil <i>Slip</i> Sesar Gempa ..... | 61        |
| 4.3 Pembahasan.....                       | 61        |
| 4.3.1 Momen Tensor.....                   | 62        |
| 4.3.2 Mekanisme Fokus Gempa .....         | 67        |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>    | <b>75</b> |
| 5.1 Kesimpulan.....                       | 75        |
| 5.2 Saran .....                           | 75        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>               | <b>77</b> |
| <b>LAMPIRAN 1.....</b>                    | <b>81</b> |
| <b>LAMPIRAN 2.....</b>                    | <b>85</b> |
| <b>BIOGRAFI PENULIS.....</b>              | <b>91</b> |



## DAFTAR GAMBAR

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Gambar 2.1</b>  | Skema Penggambaran <i>Elastic Rebound Theory</i> .....  | 8  |
| <b>Gambar 2.2</b>  | Penjalaran gelombang seismic pada suatu medium dan gerak partikel untuk gelombang P dan gelombang S .....   | 12 |
| <b>Gambar 2.3</b>  | Penjalaran gelombang Love (atas) dan Rayleigh (Bawah) menunjukkan penurunan amplitudo terhadap kedalaman .....  | 14 |
| <b>Gambar 2.4</b>  | Sistem pasangan gaya yang menyatakan komponen momen tensor dalam koordinat kartesian.....   | 16 |
| <b>Gambar 2.5</b>  | Struktur patahan normal, <i>reverse</i> dan <i>strike slip</i> .....  | 21 |
| <b>Gambar 2.6</b>  | Geometri Sesar .....  | 22 |
| <b>Gambar 2.7</b>  | Tipe-tipe dasar dan mekanisme focus yang dihasilkan .....   | 23 |
| <b>Gambar 2.8</b>  | <i>Setting</i> tektonik wilayah Jepang.....   | 26 |
| <b>Gambar 2.9</b>  | Lokasi hiposenter Gempa di wilayah Kumamoto pada tanggal 14-04-2016 pukul 12:26:34.43 (Kiri) dan pada tanggal 15-04-2016 pukul 16:25:05.47 (Kanan)..... | 27 |
| <b>Gambar 3.1</b>  | Diagram Alir Penelitian.....  | 29 |
| <b>Gambar 3.2</b>  | Peta Lokasi Penelitian di Kumamoto Jepang.....  | 30 |
| <b>Gambar 3.3</b>  | Proses Konversi Data dalam format SAC.....  | 31 |
| <b>Gambar 3.4</b>  | Tampilan Awal Program ISOLA-GUI. ....   | 31 |
| <b>Gambar 3.5</b>  | Tampilan model bumi Jepang dalam ISOLA-GUI ..   | 33 |
| <b>Gambar 3.6</b>  | Plot Vp dan Vs struktur model bumi Jepang. ....   | 33 |
| <b>Gambar 3.7</b>  | Input Informasi Parameter Gempa. ....   | 34 |
| <b>Gambar 3.8</b>  | Pemilihan stasiun gempa yang digunakan. ....  | 35 |
| <b>Gambar 3.9</b>  | Tampilan SAC Import program ISOLA-GUI. ....   | 36 |
| <b>Gambar 3.10</b> | Proses koreksi data per stasiun dan penyetaraan waktu awal gempa .....  | 36 |
| <b>Gambar 3.11</b> | Definisi sumber tunggal.....  | 37 |
| <b>Gambar 3.12</b> | Proses perhitungan Fungsi Green dalam command prompt .....  | 38 |
| <b>Gambar 3.13</b> | Tahap inversi dalam penelitian .....  | 39 |
| <b>Gambar 3.14</b> | Tahap plotting hasil inversi.....   | 40 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Gambar 3.15</b> | Hasil Inversi Waveform (a) Fitting kurva <i>Displacement</i> data observasi vs data sintetik. (b) hasil solusi <i>Centroid Moment Tensor</i> suatu gempa. | 41 |
| <b>Gambar 3.16</b> | <i>Plotting</i> bidang patahan dan <i>auxiliary plane</i> menggunakan program <i>hplot</i>  | 42 |
| <b>Gambar 4.1</b>  | Lokasi Stasiun perekam gempa Kumamoto Jepang  | 47 |
| <b>Gambar 4.2</b>  | a). Bentuk Beach ball (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk Beach ball dari NIED gempa tanggal 14/04/2016 pukul 12:26:34.43                           | 52 |
| <b>Gambar 4.3</b>  | (a). Bentuk Beach Ball (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk Beach Ball dari NIED event gempa tanggal 14/04/2016 pukul 13:07:35.29                    | 53 |
| <b>Gambar 4.4</b>  | (a). Bentuk Beach Ball (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk Beach Ball dari NIED event gempa tanggal 14/04/2016 pukul 15:03:46.45                    | 54 |
| <b>Gambar 4.5</b>  | (a). Bentuk Beach Ball (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk Beach Ball dari NIED event gempa tanggal 15/04/2016 pukul 16:25:05.47                    | 55 |
| <b>Gambar 4.6</b>  | a). Bentuk Beach Ball (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk Beach Ball dari NIED event gempa tanggal 15/04/2016 pukul 16:45:55.45                     | 56 |
| <b>Gambar 4.7</b>  | (a). Bentuk Beach Ball (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk Beach Ball dari NIED gempa tanggal 15/04/2016 pukul 18:03:10.78                          | 57 |
| <b>Gambar 4.8</b>  | (a). Bentuk Beach Ball (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk Beach Ball dari NIED gempa tanggal 15/04/2016 pukul 18:55:53.08                          | 59 |
| <b>Gambar 4.9</b>  | (a). Bentuk Beach Ball (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk Beach Ball dari NIED gempa tanggal 18/04/2016 pukul 11:41:57.94                          | 60 |
| <b>Gambar 4.10</b> | Hasil Inversi waveform data seismogram dengan data sintetik pada event gempa tanggal 14/04/2016 pukul 13:07:35.29   | 63 |
| <b>Gambar 4.11</b> | Hasil Solusi untuk momen tensor untuk gempa bumi pada tanggal 14/04/2016 pukul 13:07:35.29  | 65 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Gambar 4.12</b> | (a) lempeng tektonik yang mengelilingi Jepang (b) empat pulau utama di Jepang yang merepresentasikan system busur Jepang (c) batas lempeng system busur Jepang..... | 69 |
| <b>Gambar 4.13</b> | Patahan aktif di wilayah Kyushu berdasarkan warna garis (hijau = dextral, biru = normal, merah = <i>reverse</i> , kuning = sinistral).....                          | 70 |
| <b>Gambar 4.14</b> | <i>Beach ball</i> yang merepresentasikan mekanisme fokus gempa pada peta geologi Kyushu.....  | 71 |

## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabel 3.1</b> Model Kecepatan Bumi Jepang .....                                 | 32 |
| <b>Tabel 4.1</b> Data Event Kumamoto yang digunakan dalam penelitian .....         | 45 |
| <b>Tabel 4.2</b> Koordinat Stasiun yang digunakan dalam penelitian .               | 46 |
| <b>Tabel 4.3</b> Hasil perhitungan Momen Skalar gempa Kumamoto Jepang.....         | 48 |
| <b>Tabel 4.4</b> Perbandingan Hasil Momen Skalar data gempa Kumamoto Jepang.....   | 48 |
| <b>Tabel 4.5</b> Momen Tensor untuk Gempa Kumamoto Jepang .....                    | 50 |
| <b>Tabel 4.6</b> Bidang Sesar dan Auxiliary plane untuk Gempa Kumamoto Jepang..... | 51 |
| <b>Tabel 4.7</b> Hasil Perhitungan Displacement gempa bumi Kumamoto Jepang.....    | 61 |

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Jepang merupakan Negara kepulauan yang berada pada  $30^{\circ}$  -  $47^{\circ}$  Lintang Utara dan  $128^{\circ}$  -  $146^{\circ}$  bujur timur. Dari segi *tectonic setting*, wilayah Jepang terletak pada zona pertemuan empat lempeng utama dunia yaitu lempeng Pasifik dan Filipina di lepas pantai Jepang, sedangkan daratan Jepang berada diatas lempeng Amerika Utara dan lempeng Eurasia. Pertemuan kedua lempeng tersebut berada di tengah-tengah kepulauan Honshu. Inilah mengapa Jepang merupakan Negara yang rawan akan bencana Gempa bumi dan tsunami. Gempa bumi merupakan salah satu fenomena alam yang sering terjadi. Terjadinya gempa bumi tidak dapat dicegah maupun diprediksi. Bencana ini dapat menimbulkan kerugian fisik dan materi yang cukup besar, oleh karena itu penting untuk memahami gejala gempa bumi dengan baik sebagai upaya mitigasi bencana. Salah satu analisa gempa yang sering dilakukan adalah untuk mengetahui mekanisme penyebab gempa dan karakteristik arah gerak sesar. Maka tak heran di Negara Jepang perkembangan ilmu seismologi sangat maju dan banyak dilakukan studi untuk memahami struktur dan dinamika dalam bumi serta mekanisme gempa bumi melalui estimasi parameter sumber gempa.

Pemahaman mengenai karakteristik sesar penyebab gempa bumi perlu dilakukan, salah satunya dengan memodelkan momen tensor gempa bumi (Shearer, 2010). Menurut Sokos dan Zahradnick (2008), pemodelan momen tensor dapat dilakukan dengan menggunakan model inversi yang memanfaatkan *arrival time* gelombang P dan diestimasi

menggunakan fungsi *Green* tiga komponen. Berdasarkan pemodelan tersebut akan didapatkan parameter-parameter gempa bumi yang berupa Skala, kedalaman dan energi gempa bumi serta pola bidang patahan penyebab gempa bumi.

Dalam penelitian Tugas Akhir ini akan ditentukan besar momen tensor, karakteristik dan pola bidang sesar dari mekanisme sumber gempa serta besar *slip* yang dihasilkan oleh gempa bumi Kumamoto Jepang pada periode April 2016. *Event* gempa yang digunakan dalam penelitian merupakan gempa dengan magnitudo cukup tinggi, yaitu lebih dari sama dengan 5.8 SR. selain itu, gempa yang terjadi di Kumamoto merupakan gempa-gempa bertipe dangkal yang sangat merusak dan dapat menimbulkan korban jiwa. wilayah Kumamoto merupakan salah satu wilayah yang memiliki seismisitas paling tinggi di Jepang. Oleh karena itu pemahaman mengenai mekanisme fokus gempa dan karakter sesar di wilayah ini perlu diketahui untuk upaya mitigasi bencana selanjutnya.

Penentuan momen tensor dalam penelitian ini dilakukan menggunakan program ISOLA agar dapat diketahui besar dan arah gaya penyebab gempa bumi beserta parameter-parameter bidang patahan berupa *strike*, *dip* dan *rake* yang kemudian digunakan sebagai input untuk menentukan mekanisme fokus dan penggambaran bidang sesar. Program ISOLA merupakan perangkat lunak Fortran yang dijalankan dengan GUI Matlab. Program ISOLA merupakan program yang dapat digunakan untuk analisis data gempa diantaranya momen tensor dan mekanisme fokus. Analisa momen tensor gempa menggunakan program ISOLA memiliki kelebihan diantaranya dapat digunakan untuk pengolahan data gempa dengan magnitudo kecil kurang dari 1,2 SR dan gempa besar

dengan kekuatan lebih dari 9 SR. kelebihan lain dari program ini yaitu melibatkan koreksi instrument dari seismogram yang digunakan dan menyediakan tools untuk melakukan filter data guna menghilangkan noise sehingga didapatkan data yang lebih *smooth* dan bagus (Sokos dan Zahradnik, 2008). Parameter-parameter bidang sesar yang dihasilkan dari pengolahan data ISOLA kemudian digunakan untuk *plotting* bidang sesar menggunakan metode HC. Metode HC dapat menggambarkan penampang sesar dalam bentuk dua dimensi dengan menggunakan dua nodal.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang terdapat pada penelitian Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana menentukan besarnya momen tensor dari *event* gempa yang terjadi menggunakan inversi *waveform* tiga komponen?
2. Bagaimana mengetahui pola bidang sesar dan karakteristik sesar dari mekanisme sumber gempa?
3. Berapa besar *slip* dari sesar yang dihasilkan *event* gempa bumi di wilayah Kumamoto Jepang?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan besarnya momen tensor dari *event* gempa yang terjadi menggunakan inversi *waveform* tiga komponen.
2. Mengetahui pola bidang sesar dan karakteristik sesar dari mekanisme sumber gempa yang terjadi di wilayah

Kumamoto Jepang periode April 2016 menggunakan program ISOLA.

3. Menentukan besar *slip* dari sesar yang dihasilkan *event* gempa bumi di wilayah Kumamoto Jepang.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Penelitian tugas akhir ini dibatasi pada penentuan mekanisme gempa bumi Kumamoto Jepang sebanyak 8 gempa dengan magnitudo lebih besar sama dengan 5.8 SR menggunakan program ISOLA dengan tinjauan bumi sebagai medium isotropis.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pola bidang sesar dan mekanisme focus gempa bumi di wilayah Kumamoto Jepang serta dapat digunakan sebagai referensi dalam upaya mitigasi bencana di wilayah tersebut.

#### **1.6 Sistematika Laporan**

Sistematika penulisan Laporan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

- Bab I Pendahuluan, berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan laporan penelitian Tugas Akhir
- Bab II Dasar Teori, berisi tentang teori-teori yang menjadi landasan penyusunan tugas akhir
- Bab III Metodologi percobaan, berisi tentang metodologi penelitian yang ditempuh untuk menyelesaikan tugas akhir



- Bab IV Analisa Data dan Pembahasan, berisi tentang analisa data dan pembahasan hasil pengolahan data
- Bab V Penutup, berisi tentang bagian penutup dari tugas akhir meliputi kesimpulan yang didapat dan saran untuk penelitian selanjutnya.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

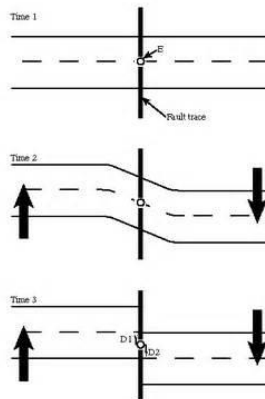
#### **2.1 Gempa Bumi**

Sejarah berkembangnya studi mengenai fenomena gempa bumi dimulai pada ke 18 dimana gempa dihubungkan dengan getaran tanah oleh gelombang elastis yang menjalar melalui kerak bumi pada sebuah fokus (Udias et al., 2014). Perubahan pada kerak bumi oleh adanya gempa seringkali menghasilkan dislokasi dan retakan. Penyebab gempa kemudian mulai dipahami saat terjadi adanya pelepasan energi yang terakumulasi di kerak bumi.

Teori yang menjelaskan terjadinya gempa bumi dikenal dengan nama elastic rebound theory yang diusulkan oleh Reid (1911). Teori ini menjelaskan bagaimana energi menyebar saat gempa bumi terjadi. Ditinjau dari model sederhana oleh sebuah blok batuan (Gambar 2.1), pada awalnya telah terdapat patahan pada batuan tersebut dan tidak ada aktivitas seismik yang terjadi. Kemudian proses akumulasi *stress* terjadi secara kontinu dan lambat disekitar patahan utama. Seiring dengan pergerakan lempeng tektonik yang bergerak beberapa cm per tahun, akan menghasilkan deformasi *pre*-seismik pada batuan disekitar patahan sehingga menstimulasi peningkatan *stress* di sekitar patahan. Bagian penting yang ada pada teori ini adalah bahwa deformasi pada patahan sebenarnya terkonsentrasi pada lapisan sempit yang lebarnya sekitar 40 km. ketika deformasi di sekitar daerah atas dekat patahan sedemikian sehingga *stress* yang melalui patahan lebih besar daripada tahanan geseknya, saat itulah akan memicu terjadinya gempa, menghasilkan pelepasan secara tiba-tiba *stress* yang

terakumulasi pada patahan kemudian batuan akan mengalami *rupture* dan akan kembali ke bentuk aslinya (*rebound*).

Pada model ideal gambar 2.1 (c), kedua sisi patahan mengalami *slip* yang uniform sampai tidak ada *stress* yang tersisa pada patahan. Walaupun pada kenyataannya ketika gempa, terjadi periode pergeseran *post*-seismik yang lambat. Seluruh proses tersebut berulang kembali pada akhir suatu gempa dengan akumulasi deformasi dekat permukaan yang lambat dan terus menerus mengalami pergeseran pada kedalaman tertentu. Pengulangan yang tak berhingga atas pembebanan lambat dan pelepasan *stress* yang cepat pada zona patahan merupakan proses yang berulang yang dinamakan siklus gempa atau *earthquake cycle*.



Gambar 2. 1 Skema Penggambaran *Elastic Rebound Theory*  
 (a). Kondisi Awal (b). deformasi pre-seismik saat dikenai *Stress* (c). pergeseran setelah kejadian gempa.

Jenis-jenis gempa bumi berdasarkan penyebabnya dapat dibedakan menjadi 3 (Bowler, 2003):

1. Gempa Bumi Tektonik

Gempa bumi tektonik merupakan gempa yang disebabkan oleh dislokasi atau perpindahan akibat adanya tarikan atau tekanan secara tiba-tiba pada struktur bumi yang menyebabkan pergeseran lapisan bumi.

2. Gempa Bumi Vulkanik

Gempa bumi vulkanik adalah gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas vulkanik atau letusan gunung api. Gempa bumi vulkanik terjadi karena adanya dinamika magma dari perut bumi. magma yang bergejolak menghasilkan energy yang mendesak lapisan bumi sehingga dapat mengangkat lapisan bumi hingga mencapai permukaan dengan disertai getaran. Getaran yang dirasakan sebelum meletusnya gunung api inilah yang merupakan gempa bumi akibat aktivitas vulkanik.

3. Gempa Bumi Runtuhan

Gempa bumi runtuhan disebabkan oleh runtuhan atap gua atau terowongan tambang di bawah tanah. Runtuhan disebabkan karena pelapukan pada atap/dinding rongga yang tidak mampu menahan beban diatas rongga. Runtuhnya gua dan terowongan menyebabkan getaran yang kuat pada daerah sekitarnya.

Dari keseluruhan gempa bumi yang terjadi, 90% diantaranya merupakan gempa bumi tektonik. Dalam penelitian ini, secara khusus hanya dibahas mengenai gempa bumi tektonik. Gempa tektonik berhubungan dengan aktivitas tektonik yang terus-menerus berlangsung dalam proses pembentukan gunung-gunung, patahan-patahan (*faults*) dan tarikan atau tekanan dari pergerakan lempeng-lempeng batuan

penyusun kerak bumi. Menurut Afnimar (2009), pergerakan lempeng yang dinamis dan lambat kerap menimbulkan gempa bumi di batas lempeng akibat energy yang terakumulasi selama bertahun-tahun dan menghasilkan *slip* secara tiba-tiba.

## 2.2 Penjalaran Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah energi yang ditimbulkan oleh sumber getaran yang merambat melalui medium elastis berupa batuan di bawah permukaan bumi. Oleh karena bumi dapat dianggap sebagai objek elastis, gelombang seismik dapat merambat saat dikenai gangguan seperti gempa, ledakan, tanah longsor maupun letusan gunung berapi.

Kerak bumi yang terdiri dari beberapa lapisan batuan yang berbeda menyebabkan perbedaan perilaku gelombang dalam perambatannya berdasarkan jenis batuan yang dilalui gelombang tersebut. Bormann (2009) menyatakan bahwa batuan di dalam bumi mengalami *stress* (kompresi, tensi maupun pergeseran) pada saat gelombang seismic melaluinya, kemudian terjadi perubahan volume atau bentuk yang dinamakan *strain*.

Persamaan umum dari penjalaran gelombang seismik diawali dari hukum kedua Newton :

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \dots \dots \dots (2.1)$$

dan untuk medium kontinu persamaannya menjadi :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \partial_j \sigma_{ij} + f_i \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana  $\rho$  adalah densitas,  $\mathbf{u}$  adalah perpindahan, dan  $\boldsymbol{\sigma}$  adalah tensor tegangan. Indeks  $i$  dan  $j$  bernilai 1 hingga 3 (sesuai arah  $x, y$  dan  $z$ ). Sedangkan suku  $\partial_j \sigma_{ij} = \partial \sigma_{ix} / \partial x + \partial \sigma_{iy} / \partial y + \partial \sigma_{iz} / \partial z$ . Masing-masing suku  $u_i$ ,  $\tau_{ij}$  dan  $f_i$  adalah berupa fungsi posisi  $x$  dan waktu. Suku  $f_i$  dapat

diabaikan untuk perhitungan gelombang badan dan permukaan pada seismologi mode normal. Solusi Persamaan (2.2) yang memprediksi pergerakan tanah pada jarak tertentu dari pusat gempa disebut seismogram sintetik (Shearer. 2010). Dengan ketiadaan suku  $f_i$ , persamaan (2.2) menjadi:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \partial_j \sigma_{ij} \dots\dots\dots (2.3)$$

### 2.2.1 Tipe-Tipe Gelombang Seismik

Kita telah mendapatkan persamaan gerak homogen pada medium elastis melalui persamaan (2.3). Dengan mensubstitusikan parameter regangan dan tegangan, hasilnya dapat ditulis sebagai:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} \dots\dots\dots (2.4)$$

Solusi dari persamaan (2.4) menghasilkan 2 tipe gelombang yang merupakan gelombang bodi (gelombang yang merambat pada medium). dapat dilakukan operasi divergensi dan operasi *curl*. Yang pertama dilakukan operasi divergensi untuk mendapatkan tipe gelombang P:

$$\frac{\partial^2 (\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \nabla^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}) \dots\dots\dots (2.5)$$

Atau

$$\nabla^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 (\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan  $\alpha$  merupakan kecepatan gelombang tipe P, diberikan oleh

$$\alpha = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Menerapkan operasi *curl* pada persamaan (2.4) akan menghasilkan tipe gelombang S yaitu :

$$\frac{\partial^2(\nabla \times \mathbf{u})}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2(\nabla \times \mathbf{u}) \dots\dots\dots (2.8)$$

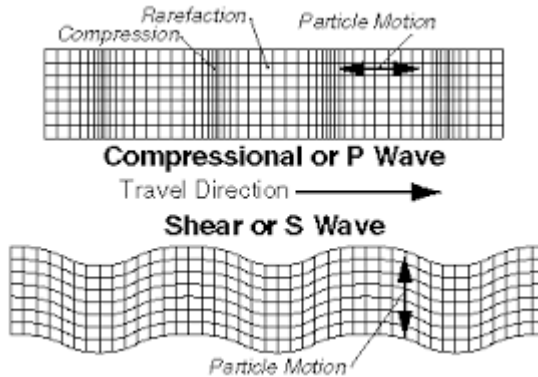
Atau

$$\nabla^2(\nabla \times \mathbf{u}) = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2(\nabla \times \mathbf{u})}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan  $\beta$  adalah kecepatan gelombang tipe S, diberikan oleh (Afnimar.2009) :

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \dots\dots\dots (2.10)$$

Arti fisis dari operasi divergensi yaitu terjadi perubahan volume dan bentuk dengan arah osilasi searah dengan arah rambat dan *displacement*-nya. Operasi *curl* memperlihatkan gerak partikel pada suatu medium tegak lurus terhadap arah rambat gelombang dan mengalami perubahan bentuk tanpa perubahan volume. Skema perambatan gelombang P dan gelombang S dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2. 2 penjalaran gelombang seismic pada suatu medium dan gerak partikel untuk gelombang P dan gelombang S

Gambar 2.2 memperlihatkan bahwa gelombang P merambat searah dengan arah rambat gelombang. Gerak



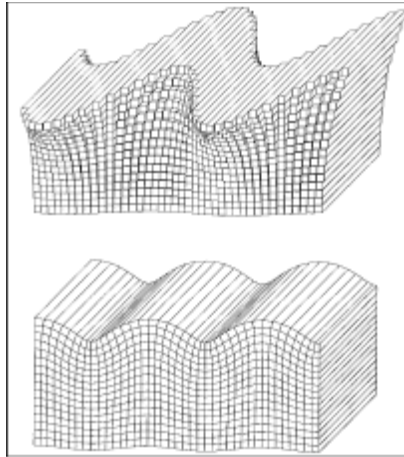
partikel berupa kompresi (pemampatan) dan dilatasi (perenggangan). Sedangkan arah gerak partikel pada saat dilewati gelombang S tak berhingga jumlahnya. Hal ini disebabkan karena arah tegak lurus terhadap arah rambat gelombang berjumlah tak terhingga. Oleh karena itu, para seismologis membagi tipe gelombang S menjadi 2, yaitu SV (*Shear Vertical*) dan SH (*Shear Horizontal*). Arah gerak gelombang SV tegak lurus terhadap arah rambat gelombang dan menjalar pada bidang vertical, sedangkan SH bergerak tegak lurus terhadap arah rambat gelombang dan searah bidang horizontal atau sejajar dengan permukaan bumi.

Tipe lain dari gelombang sesimik yaitu Gelombang Permukaan. Pada umumnya, sumber gempa terletak di kedalaman tertentu di bawah permukaan bumi. Kita telah membahas gelombang badan yang menjalar dalam medium homogen isotropis. Jika gelombang tersebut berinterferensi menghasilkan sifat-sifat tertentu dan berinteraksi dengan permukaan bebas, maka akan terbentuk gelombang baru yang dinamakan gelombang permukaan. Dalam hal ini, interaksi yang dimaksud adalah antara medium batuan bumi dengan udara bebas. Gelombang permukaan meliputi gelombang *Love* dan gelombang *Rayleigh*.

Gelombang *Love* terbentuk melalui interferensi konstruktif dari gelombang SH yang mengalami pantulan berulang pada permukaan bebas. Gelombang ini membutuhkan “pandu gelombang” oleh kecepatan yang meningkat terhadap kedalaman. Arah gerak partikel dari gelombang ini sama dengan SH akan tetapi amplitudonya berkurang terhadap kedalaman.

Tipe kedua adalah gelombang *Rayleigh*. Gelombang *Rayleigh* dihasilkan dari interferensi gelombang pantul P dan

SV yang memiliki kecepatan lebih lambat daripada gelombang *Love*. Pergerakan partikel pada permukaan berbentuk eliptik dan berlawanan arah jarum jam. Gelombang ini akan berkurang amplitudonya secara eksponensial seiring meningkatnya kedalaman.



Gambar 2. 3 penjalaran gelombang Love (atas) dan Rayleigh (Bawah) menunjukkan penurunan amplitudo terhadap kedalaman (Shearer, 1999)

### 2.3 Seismic Moment Tensor

Gempa bumi disebabkan oleh adanya gerakan sesar di bawah permukaan bumi dengan karakteristik tertentu. Untuk dapat mengetahui gerak sesar dan karakter sesar penyebab gempa, dapat diketahui berdasarkan momen tensor gempa bumi yang dapat menggambarkan arah gaya penyebab gempa bumi.

Istilah momen tensor pertama kali dicetuskan oleh Gilbert (1970) yang dikaitkan dengan penurunan *Stress*  $\Delta\delta$ ,

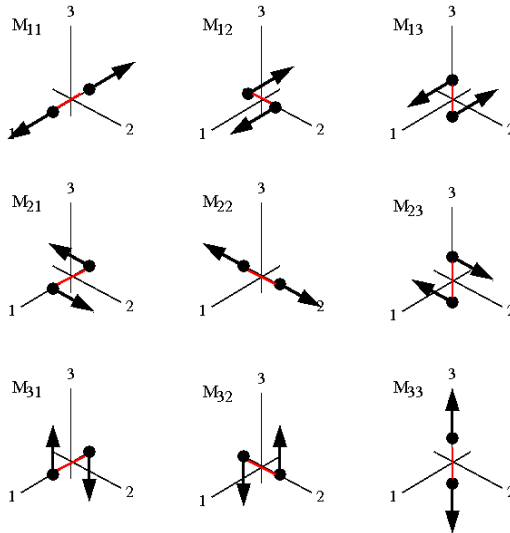
( $\Delta\delta = \delta_0 - \delta_f$ ) yang terletak di sumber gempa. Menurut Bachus and Mulcahy (1976), momen tensor menyatakan bagian dari perubahan *stress* internal yang menyebabkan deformasi non-elastik pada sumber, yaitu proses patahan (*Fracture Process*). Sumber yang non-elastik oleh *stress* internal dapat dinyatakan dalam bentuk momen tensor seismik,  $M_{ij}$ . Momen tensor seismik dapat menyatakan sebuah sumber titik atau sumber luas yang diekspresikan sebagai integral volume sumber tertentu atau permukaan sumber dari sebuah densitas volume momen tensor  $m_{ij}$  atau densitas permukaan  $m'_{ij}$  (Udias et al., 2014) :

$$M_{ij} = \int_{V_0} m_{ij} dV = \int_{\Sigma} m'_{ij} dS \dots \dots \dots (2.11)$$

Momen tensor seismic selalu bersifat simetris. Momen tensor dapat dideskripsikan sebagai pasangan ganda (*Double Couple*) yang memiliki solusi sembilan komponen momen tensor. Momen tensor menggambarkan kekuatan dari kopel gaya gempa dalam bentuk matriks 3x3 sebagai berikut :

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{xy} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{xz} & M_{yz} & M_{zz} \end{bmatrix} \dots \dots (2.12)$$

Elemen diagonal pada matriks di atas menyatakan dipol vektor linier, sedangkan elemen luar diagonal menyatakan pasangan gaya berlawanan (momen). Kesembilan komponen momen tensor tersebut dinyatakan dalam gambar sebagai berikut:



Gambar 2. 4 Sistem pasangan gaya yang menyatakan komponen momen tensor dalam koordinat kartesian (Tosten dan Frank, 2014)

## 2.4 Inversi *Waveform* Tiga Komponen

Inversi merupakan teori matematika yang menjelaskan bagaimana informasi tentang suatu system fisik terparameterisasi dapat diturunkan dari sekumpulan data hasil pengamatan (Grandis, 2009). Pemanfaatan teori inversi dalam bidang geofisika secara luas telah dikembangkan untuk memodelkan interior bumi dari sekumpulan data fisika yang diamati di permukaan. Pemecahan inversi biasanya dilakukan dengan mencari suatu model yang optimum yang mendekati data pengamatan dari respon yang dihasilkan. Hal ini dilakukan dengan meminimumkan suatu fungsi obyektif tertentu yang menggambarkan seberapa dekat data pengamatan (observasi) dengan respon hasil perhitungan (sintesis) suatu model (Menke, 1993).

Untuk mengetahui seberapa besar resiko yang diakibatkan oleh gempa bumi di permukaan, penting untuk mengetahui informasi terkait parameter gempa yakni hiposenter, kekuatan gempa, momen seismik, momen tensor, orientasi bidang sesar, pola dan luas bidang sesar. Parameter-parameter tersebut didapatkan dengan melakukan inversi *waveform* tiga komponen yaitu proses inversi yang melibatkan tiga komponen seismogram yaitu komponen vertikal dan komponen horizontal Utara-Selatan serta Barat-Timur.

Masalah inversi yang akan diselesaikan adalah menentukan suatu himpunan model parameter yang tidak diketahui yaitu  $m = [m_i]$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ) dari himpunan data hasil pengamatan yaitu  $d = [d_i]$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ). inversi yang digunakan untuk mendapatkan solusi momen tensor adalah jenis inversi linier yang bersifat *over determined* dimana jumlah data jauh lebih banyak daripada jumlah parameter. hubungan keduanya dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$d = G m \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1M} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N1} & G_{N2} & \cdots & G_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_N \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.14)$$

Sehingga didapatkan solusi inversi linier dari parameter model ( $m$ ) sesuai dengan persamaan (Masykur, 2011) :

$$m = [G^T G]^{-1} G^T d \dots\dots\dots (2.15)$$

Dengan menggunakan inversi momen tensor, proses sumber gempa secara detail dapat didapatkan dari pengamatan data. Momen tensor untuk berbagai jenis gempa bumi dapat ditentukan secara rutin. Juga mencoba dan melakukan *modeling* kesalahan dengan memperlakukan secara hati-hati dan seksama dari data tersebut dapat menghasilkan pengetahuan penting sekitar sumber gempa (Yoshida, 1995).

## 2.5 Fungsi Green

Fungsi *Green* merupakan *tool* yang sangat penting dalam representasi matematis tentang mekanisme gempa. Fungsi *Green* seringkali digunakan untuk mengkonstruksi solusi persamaan differensial tak homogen. Cara yang digunakan untuk perumusan Fungsi *Green* antara lain transformasi *Fourier* dan metode integral lintasan. Metode integral lintasan mampu untuk menyelesaikan permasalahan dalam mekanika kuantum yang kompleks dibandingkan metode transformasi *Fourier*. Konsep Fungsi *Green* digunakan untuk menghitung momen tensor dari data *event* gempa. Persamaan umum fungsi *Green* adalah:

$$U(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(r, c, t) f(c, t) d^3c \dots\dots (2.16)$$

Sehingga komponen rekaman seismik dari sebuah sumber gempa dapat dinyatakan:

$$U_k(r, t) = \sum_{i=6}^6 G_{ki}(r, c, t) * f_i(c, t) \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan  $U_k$  adalah rekaman pergeseran pada komponen ke- $k$ ,  $r$  adalah posisi *receiver*,  $c$  adalah posisi sumber gempa (*centroid*),  $G_{ki}$  adalah fungsi green, dan  $f_i(c, t)$  menyatakan enam komponen *independent* momen tensor. Persamaan

untuk mendapatkan momen tensor diperoleh dengan mengekspansikan fungsi *Green* menggunakan deret Taylor dengan posisi sumber  $c$  sebagai berikut :

$$M_{jk} = \iiint c_k f_n(c, t) d^3c \dots\dots\dots (2.18)$$

dimana  $M_{jk}$  adalah komponen momen tensor pada arah  $k$  dengan bidang normal  $j$  (Aki dan Richard, 1980). Nilai komponen  $M_{jk}$  dapat digunakan untuk mengetahui parameter *strike* ( $\phi$ ), *dip* ( $\delta$ ), dan *rake* ( $\lambda$ ) penyebab gempa bumi. Dari kesembilan komponen momen tensor, hanya tersisa 6 momen tensor independen dikarenakan komponen  $M_{jk} = M_{kj}$ . Persamaan berikut menyatakan hubungan *strike* ( $\phi$ ), *dip* ( $\delta$ ), dan *rake* ( $\lambda$ ) :

$$\begin{aligned} M_{11} &= M_{xx} = -M_0(\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi + \sin 2\delta \cos \lambda \sin 2\phi) \\ M_{12} &= M_{xy} = M_0(\sin \delta \cos \lambda \cos 2\phi \\ &\quad + 0.5 \sin 2\delta \cos \lambda \sin 2\phi) = M_{21} = M_{yx} \\ M_{13} &= M_{xz} = -M_0(\cos \delta \cos \lambda \cos \phi + \cos 2\delta \sin \lambda \sin \phi) \\ &= M_{31} = M_{zx} \\ M_{22} &= M_{yy} = M_0(\sin \delta \cos \lambda \sin 2\phi - \sin 2\delta \sin \lambda \cos 2\phi) \\ M_{23} &= M_{yz} = -M_0(\cos \delta \cos \lambda \sin \phi - \cos 2\delta \sin \lambda \cos \phi) \\ &= M_{32} = M_{zy} \\ M_{33} &= M_{zz} = -(M_{11} + M_{22}) = M_0(\sin 2\delta \sin \lambda) \\ &\dots\dots\dots (2.19) \end{aligned}$$

$M_0$  merupakan parameter momen seismik untuk mengukur kekuatan gempa bumi berdasarkan persamaan :

$$M_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [\sum_{ij} M_{ij}^2]^{1/2} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan mengetahui komponen momen tensor dari persamaan (2.19), kita akan dapat memperoleh momen seismik dan *focal*

*mechanism* gempa bumi sehingga dapat memperkirakan arah bidang sesar dari sumber gempa bumi (Hasan. 2014).

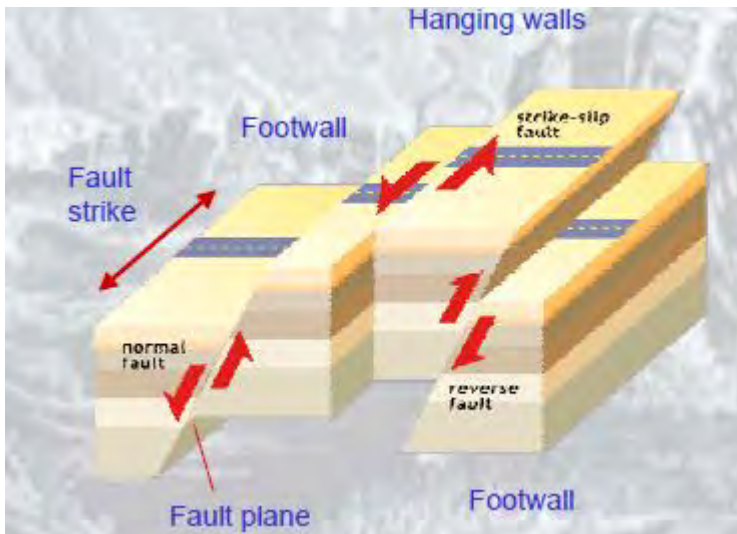
## 2.6 Mekanisme Fokus

Sebagian besar gempa bumi yang terjadi adalah gempa bumi tektonik dan berlokasi di sekitar patahan/sesar. Patahan/sesar yang dapat membangkitkan gempa terletak pada bagian atas kerak bumi yang bersifat rapuh (*brittle*). Bagian tersebut dinamakan lapisan seismogenik (*seismogenic layer*). Akan tetapi, tidak semua gempa yang terjadi sekarang berasal dari sesar yang ada, karena tidak semua sesar yang ada saat ini masih aktif secara seismic. Patahan dapat juga bergerak tanpa membangkitkan gempa bumi. Gerakan ini disebut dengan *fault creep*.

Pergerakan sesar disebabkan oleh gaya tektonik yang dihasilkan dari arus konveksi pada mantel di lempeng litosfer. Oleh karena itu, Pergerakan antar lempeng menyebabkan sebagian besar gempa bumi yang terjadi pada batas-batas lempeng (*interplate earthquake*), namun hanya sedikit gempa bumi yang terjadi di interior lempeng (*intraplate earthquake*). Interaksi antar batas lempeng yang menghasilkan sesar secara umum dibagi menjadi tiga macam (Udias et al. ,2014):

1. Dimana lempeng-lempeng terpisah satu sama lain (pada zona ekstensi), menghasilkan *normal fault*
2. Dimana lempeng saling bertumbukan (pada zona tabrakan dan subduksi), menghasilkan *reverse fault*
3. Dimana lempeng bergeser secara horizontal terhadap satu sama lain, menghasilkan *strike-slip fault*



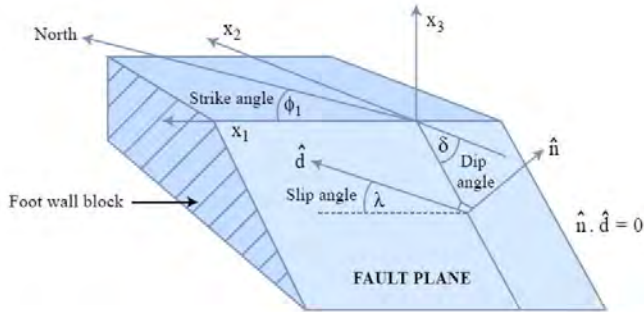


Gambar 2. 5 struktur patahan normal, *reverse* dan *strike slip*.  
(UCL: earthquake focal mechanism lecture)

### 2.6.1 Geometri patahan

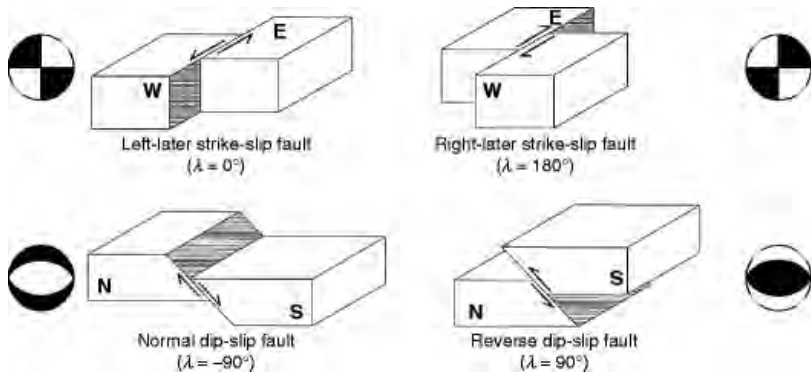
Sesar/patahan didefinisikan sebagai retakan pada kerak bumi yang memiliki perpindahan relatif pada dua sisinya. Perpindahan relatif (*relative displacement*) dari kedua sisi patahan, adalah vektor *slip*  $\vec{d}$ . Vektor *slip* selalu terletak pada bidang sesar dan tegak lurus dengan vektor normal  $\hat{n}$ . Sudut *strike*  $\phi_1$  adalah sudut perpotongan bidang sesar dengan bidang horizontal ( $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ ). Sudut *dip*  $\delta$  adalah sudut antara permukaan bidang horizontal dengan bidang sesar yang bervariasi antara ( $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ ). Sudut ketiga, sudut *rake* atau *slip*  $\lambda$ , menyatakan arah gerakan bidang sesar. Sudut *rake* diukur diukur dari arah *slip* dengan horizontal, nilainya bervariasi ( $-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$ ). Sudut *rake* bernilai negative

untuk *normal fault*, sebaliknya bernilai positif untuk *reverse fault*.



Gambar 2. 6 Geometri Sesar (Stein & Wysession, 2003)

Nilai dari  $\delta$  dan  $\lambda$  dapat menggambarkan jenis patahan yang berbeda. Untuk  $\lambda = 0^\circ$  dan  $\lambda = 180^\circ$  akan terjadi *strike-slip* murni. Terdapat dua macam sesar *strike-slip*, yaitu *left lateral* dan *right lateral* yang ditentukan dari blok yang bersebrangan dengan tempat dimana pengamat berdiri (gambar 2.6). jenis sesar yang lain yaitu sesar *dip slip* yang bernilai  $\lambda = -90^\circ$  menghasilkan sesar normal dan jika  $\lambda = 90^\circ$  akan terjadi sesar naik (*reverse fault*).



Gambar 2. 7 tipe-tipe dasar dan mekanisme focus yang dihasilkan (Okal E, 2011)

## 2.7 Program ISOLA-GUI

Berdasarkan Sokos dan Zahrandik (2008), Program ISOLA-GUI merupakan program yang menggunakan *tool* Matlab dan bertujuan untuk mempermudah perhitungan dengan Fortran dengan cepat, seperti persiapan data, perhitungan Fungsi *Green* dan proses inversi serta hasil dalam bentuk gambar grafis dari *focal mechanism*

Sokos (2009) menjelaskan bahwa Program ISOLA berdasarkan pada representasi *multiple point - source* dan metode iterasi dekonvolusi seperti yang digunakan oleh Kikuchi dan Kanamori (1991) untuk data gempa teleseismik. Dan untuk menghitung Fungsi *Green* menggunakan metode *discrete wavenumber* oleh Bouchon (2003). Metode ini baik digunakan untuk gempa lokal dan regional. Inversi yang digunakan dalam program ini adalah inversi linier dengan  $d$  merupakan data dan  $m$  adalah parameter yang dicari.

$$d = G m \dots \dots \dots (2.13)$$

yang dapat diselesaikan dengan metode *least-square*

$$m = [G^T G]^{-1} G^T d \dots \dots \dots (2.15)$$

ISOLA-GUI digunakan untuk menjelaskan *focal mechanism* dari momen tensor gempa. Dari proses inversi dapat diketahui besar nilai eigen dan vektor eigennya. vektor eigen memberikan nilai *strike*, *dip*, dan *rake (slip)*. Nilai eigen memberikan besar momen skalar  $M_0$ . Untuk mendapatkan hasil yang bagus, maka dilakukan *fitting* kurva *displacement* untuk data sintetis dengan data lapangan. Dimisalkan,  $d$  adalah data lapangan dan  $s$  adalah data sintetis. Kecocokan (*fit*) diantara kedua data diukur dengan *variance reduction (varred)* dengan persamaan,

$$varred = 1 - \frac{|d-s|^2}{d^2} \dots\dots\dots (2.21)$$

Nilai 1 menunjukkan kurva data sintetis berimpit dengan kurva data observasi, apa bila kurang dari satu, maka terjadi perbedaan pada kurvanya sehingga akan menghasilkan ketidakcocokan perhitungan antara besar *event* yang ada dengan hasil pengolahan. Ketidakcocokan ini dipengaruhi oleh penentuan jumlah *subevent* yang akan menghasilkan residual data yang berpengaruh pada nilai *varred* (Sokos dan Zahrandik, 2009). Selain, jumlah *subevent*, proses *filtering* berpengaruh pada perioda yang akan digunakan oleh program ISOLA-GUI dari data seismogram dalam proses perhitungan inversi.

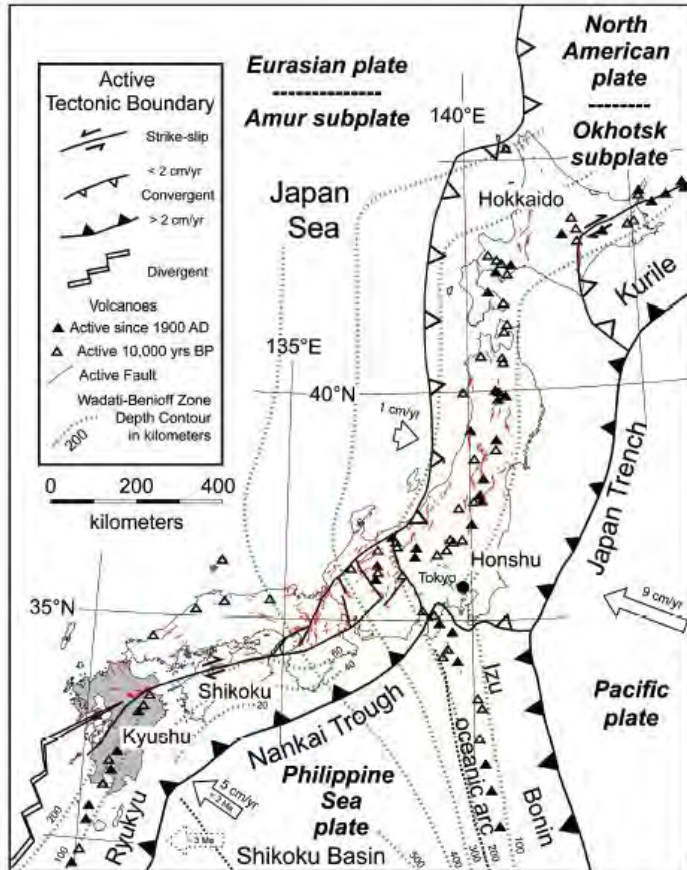
## 2.8 Tatanan Tektonik Jepang

Kepulauan Jepang terletak pada pertemuan empat lempeng utama dunia yaitu lempeng samudera Pasifik dan laut Filipina serta lempeng benua Amerika Utara (Okhotsk) dan Eurasia (Amur). Lempeng Pasifik bergerak menuju Barat Laut dan mensubduksi daratan Jepang di wilayah Hokkaido dan Utara Honshu yang menyebabkan terbentuknya palung Jepang (*Japan Trench*). Lempeng Filipina bergerak kearah barat daya membentuk batas lempeng konvergen dengan lempeng Eurasia sehingga menyebabkan terbentuknya palung

Nankai. Sedangkan lempeng Eurasia bergerak ke arah tenggara menuju daratan Jepang (Zhao et al., 2011). Interaksi yang kuat antara keempat lempeng tersebut yang menjadikan wilayah Jepang memiliki aktivitas seismic dan vulkanik yang tinggi.

Aktivitas seismic yang tinggi ditandai dengan tingginya intensitas terjadinya gempa bumi di Jepang disebabkan karena Jepang terletak di zona subduksi. Palung Jepang terbentuk akibat adanya Zona subduksi yaitu penunjaman lempeng pasifik di daratan Jepang. Pertemuan antara lempeng Amerika Utara dan Filipina di tengah-tengah Honshu dimana lempeng Eurasia bergerak ke arah lempeng Amerika Utara dan mensubduksi daratan Jepang. Sedangkan zona subduksi akibat penunjaman lempeng Pasifik terhadap lempeng Filipina membentuk *oceanic arc*. Oleh karena itu dapat disimpulkan jika wilayah Jepang didominasi oleh zona subduksi akibat penunjaman lempeng tektonik.

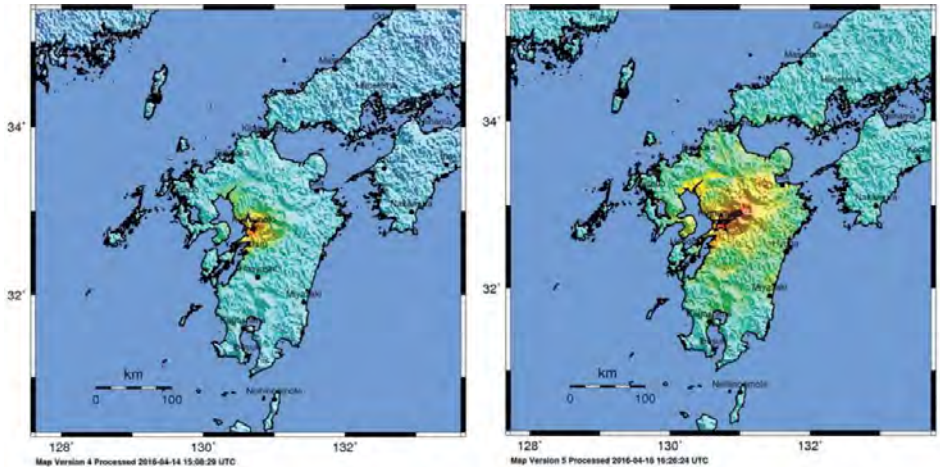
Pada pertengahan April 2016, dunia dikejutkan dengan aktivitas seismic berkekuatan tinggi melalui rangkaian gempa yang terjadi di prefektur Kumamoto, kepulauan paling selatan di wilayah Jepang. Pada tanggal 14 April 2016 pukul 21:26 waktu setempat (12:26 waktu GMT), gempa berkekuatan 6.5 SR terjadi sekitar 12 Km di barat laut kota Kumamoto, yang terletak di Kyushu. Kemudian disusul dengan gempa berkekuatan 6.4 SR pada pukul 15:03 di 10 Km selatan kota Kumamoto. Kedua gempa tersebut terjadi di kedalaman 10 Km yang dapat dikategorikan sebagai gempa dangkal. Berdasarkan US Geological Survey (USGS), kedalaman gempa yang dangkal pada *event-event* gempa tersebut menandakan bahwa gempa-gempa tersebut terjadi di patahan yang terdapat di darat (*Crustal Faults*).



Gambar 2. 8 *Setting* tektonik wilayah Jepang  
(Wei and Seno, 1998; Heki et al., 1999)

Di wilayah Kyushu bagian tenggara terdapat Palung Ryukyu dimana lempeng laut Filipina mensubduksi di bawah wilayah Jepang. Pergerakan konvergen lempeng laut Filipina dan lempeng Amur setara 72-79 mm/tahun mendominasi kondisi tektonik Kyushu saat ini. Gempa yang pernah terjadi

di Kyushu diketahui memiliki semua macam jenis sesar, hal ini mencerminkan setting tektonik aktif yang kompleks dan dinamis di wilayah Kyushu.



Gambar 2. 9 Lokasi hiposenter Gempa di wilayah Kumamoto pada tanggal 14-04-2016 pukul 12:26:34.43 (Kiri) dan pada tanggal 15-04-2016 pukul 16:25:05.47 (Kanan).

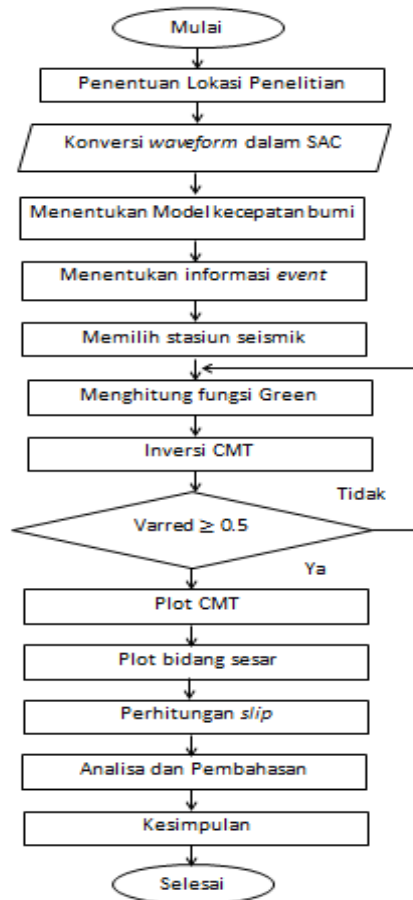
*“halaman ini sengaja dikosongkan”*



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan berdasarkan mekanisme diagram alir seperti Gambar 3.1 :



Gambar 3. 1 Diagram Alir dalam penelitian

### 3.2 Penentuan Lokasi Penelitian

Lokasi yang digunakan dalam penelitian adalah wilayah Kumamoto, Jepang yang berada pada  $32^{\circ}47'00''$  Lintang Utara dan  $130^{\circ}44'00''$  Bujur timur. data yang digunakan berasal dari website NIED (*National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*) [www.fnet.bosai.jp](http://www.fnet.bosai.jp) . Sebanyak 8 *event* gempa yang digunakan merupakan gempa yang terjadi di daerah penelitian selama periode April 2016 dengan magnitudo  $\geq 5.3$  SR.



Gambar 3. 2 Petal Lokasi Penelitian di Kumamoto, Jepang

### 3.3 Konversi *Waveform* dalam format SAC

Data yang diunduh dari website NIED berupa format seed. Untuk dapat diolah pada program ISOLA-GUI, perlu untuk merubah format *seed* ke dalam format *SAC* menggunakan program Jrdseed untuk OS windows. Konversi data dilakukan agar *waveform* gempa dapat terbaca dalam 3 komponen, yaitu komponen Horizontal (N dan E) serta komponen Vertikal yaitu Z. dalam penelitian ini, digunakan

seed channel berupa BH yakni *Broadband High gain* untuk 3 komponen seismometer.

```

Microsoft Windows [Version 6.3.9600]
(c) 2013 Microsoft Corporation. All rights reserved.

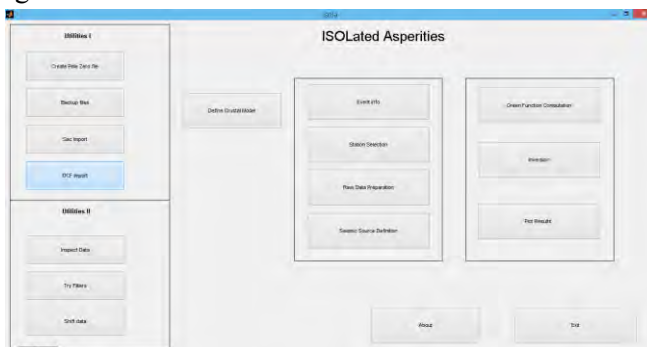
C:\Users\Sony>D:
D:\>cd cinIA
D:\cinIA>cd "Data Event"
D:\cinIA\Data Event>cd 2014-02-18T033409
D:\cinIA\Data Event\2014-02-18T033409>java -jar D:\JrdseedVer0.10.1.jar
<< Java SEED Reader, Release 0.10.1 237 >>
Input File </dev/nrst0> or 'Quit' to Exit: 2014-02-18T033409_Package_1454846058
Output File <stdout> :
Volume # [(1)-N] :
Options [acCsSptde] : dR
Station List <ALL> :
Channel List <ALL> :
Network List <ALL> :
Loc Ids <ALL [ "-" for spaces]> :
  
```

Gambar 3. 3 Proses Konversi Data dalam Format SAC

### 3.4 Proses Pengolahan Data

#### 3.4.1 Pengolahan Data dalam ISOLA-GUI

Setelah dikonversi, langkah selanjutnya adalah pengolahan data menggunakan program ISOLA-GUI dalam Matlab. Adapun tampilan program ISOLA-GUI adalah sebagai berikut :



Gambar 3. 4 Tampilan awal program ISOLA-GUI

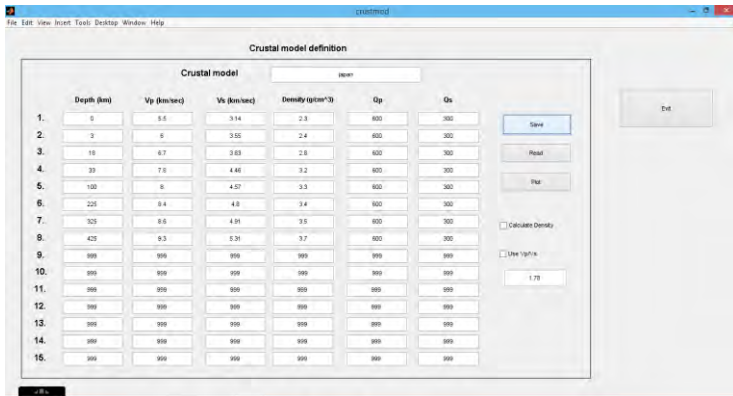
Langkah selanjutnya dalam pengolahan data menggunakan program ISOLA-GUI dijelaskan sebagai berikut :

#### 1. Model Kecepatan Bumi

Agar didapatkan hasil yang sesuai dengan kondisi yang sebenarnya, digunakan model kecepatan bumi Jepang yang diusulkan oleh Kubo et. al (2002) berupa struktur kecepatan horizontal multi-layer.

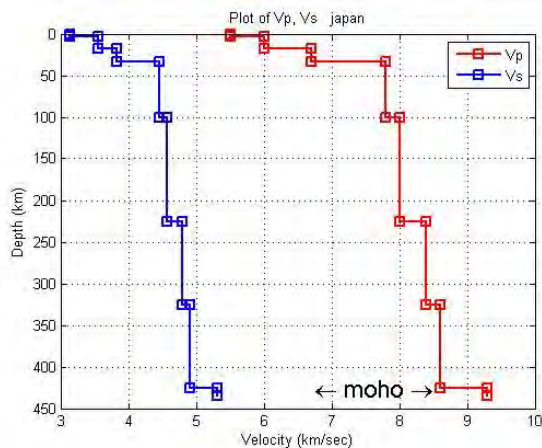
Tabel 3. 1 Model Kecepatan Bumi Jepang

| No | kedalaman (km) | Vp (km/s) | Vs (km/s) | massa jenis (kg/m <sup>3</sup> ) | Qp  | Qs  |
|----|----------------|-----------|-----------|----------------------------------|-----|-----|
| 1  | 0              | 5.5       | 3.14      | 2300                             | 600 | 300 |
| 2  | 3              | 6         | 3.55      | 2400                             | 600 | 300 |
| 3  | 18             | 6.7       | 3.83      | 2800                             | 600 | 300 |
| 4  | 33             | 7.8       | 4.46      | 3200                             | 600 | 300 |
| 5  | 100            | 8         | 4.57      | 3300                             | 600 | 300 |
| 6  | 225            | 8.4       | 4.8       | 3400                             | 600 | 300 |
| 7  | 325            | 8.6       | 4.91      | 3500                             | 600 | 300 |
| 8  | 425            | 9.3       | 5.31      | 3700                             | 600 | 300 |



Gambar 3. 5 Tampilan model bumi Jepang dalam ISOLA-GUI

Untuk melihat hubungan kecepatan gelombang P dan gelombang S terhadap kedalaman dari model bumi yang digunakan, dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3. 6 Plot Vp dan Vs struktur model bumi Jepang

**Event Info**

|                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| <b>Lat (deg.Min)</b> | <b>Lat (Decimal Degrees)</b> |
| 38.00 00.00          | 32.7700                      |
| <b>Depth (M)</b>     |                              |
| 000M-0000            | 0.00                         |
| <b>Loc (deg.Min)</b> | <b>Loc (Decimal Degrees)</b> |
| 21.00 00.00          | 136.0000                     |

**Comments**

**Event Origin Time**

Update

**Data start time**

Time

1.2

Min

7

Seconds

0

**Data Options**

Time Length (sec)

400.0

400.0

800.0

1600.0

3200.0

6400.0

12800.0

25600.0

51200.0

102400.0

204800.0

409600.0

819200.0

1638400.0

3276800.0

6553600.0

13107200.0

26214400.0

52428800.0

104857600.0

209715200.0

419430400.0

838860800.0

1677721600.0

3355443200.0

6710886400.0

13421772800.0

26843545600.0

53687091200.0

107374182400.0

214748364800.0

429496729600.0

858993459200.0

1717986918400.0

3435973836800.0

6871947673600.0

13743895347200.0

27487790694400.0

54975581388800.0

109951162777600.0

219902325555200.0

439804651110400.0

879609302220800.0

1759218604441600.0

3518437208883200.0

7036874417766400.0

14073748835532800.0

28147497671065600.0

56294995342131200.0

112589990684262400.0

225179981368524800.0

450359962737049600.0

900719925474099200.0

1801439850948198400.0

3602879701896396800.0

7205759403792793600.0

14411518807585587200.0

28823037615171174400.0

57646075230342348800.0

115292150460684697600.0

230584300921369395200.0

461168601842738790400.0

922337203685477580800.0

1844674407370955161600.0

3689348814741910323200.0

7378697629483820646400.0

14757395258967641292800.0

29514790517935282585600.0

59029581035870565171200.0

118059162071741130342400.0

236118324143482260684800.0

472236648286964521369600.0

944473296573929042739200.0

1888946593147858085478400.0

3777893186295716170956800.0

7555786372591432341913600.0

15111572745182864683827200.0

30223145490365729367654400.0

60446290980731458735308800.0

120892581961462917470617600.0

241785163922925834941235200.0

483570327845851669882470400.0

967140655691703339764940800.0

1934281311383406679529881600.0

3868562622766813359059763200.0

7737125245533626718119526400.0

15474250491067253436239052800.0

30948500982134506872478105600.0

61897001964269013744956211200.0

123794003928538027489912422400.0

247588007857076054979824844800.0

495176015714152109959649689600.0

990352031428304219919299379200.0

1980704062856608439838598758400.0

3961408125713216879677197516800.0

7922816251426433759354395033600.0

15845632502852867518708790067200.0

31691265005705735037417580134400.0

63382530011411470074835160268800.0

126765060022822940149670320537600.0

253530120045645880299340641075200.0

507060240091291760598681282150400.0

1014120480182583521197362564300800.0

2028240960365167042394725128601600.0

4056481920730334084789450257203200.0

8112963841460668169578900514406400.0

16225927682921336339157801028812800.0

32451855365842672678315602057625600.0

64903710731685345356631204115251200.0

129807421463370690713262408230502400.0

259614842926741381426524816461004800.0

519229685853482762853049632922009600.0

1038459371706965525706099265844019200.0

2076918743413931051412198531688038400.0

4153837486827862102824397063376076800.0

8307674973655724205648794126752153600.0

16615349947311448411297588253504307200.0

33230699894622896822595176507008614400.0

66461399789245793645190353014017228800.0

132922799578491587290380706028034457600.0

265845599156983174580761412056068915200.0

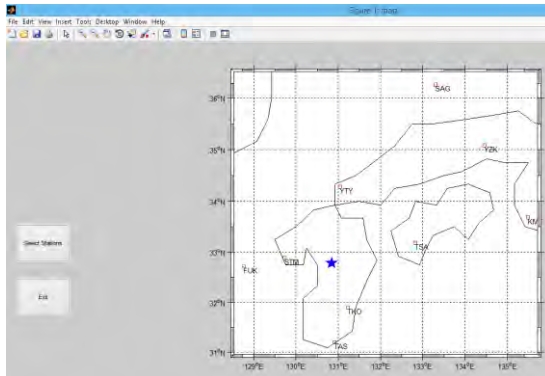
531691198313966349161522824112137830400.0

1063382396627932698323045648224275660

Gambar 3. 7 Input informasi parameter gempa

### 3. Pemilihan Stasiun

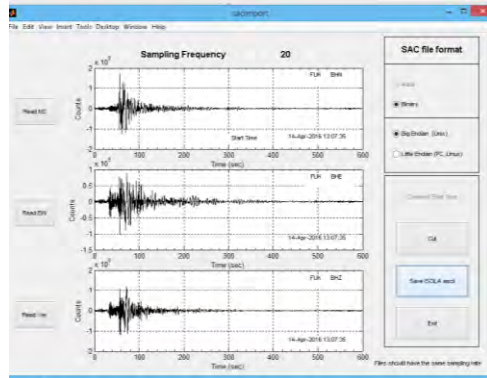
Langkah selanjutnya dilakukan pemilihan stasiun perekam data gempa yang digunakan dalam penelitian



Gambar 3. 8 Pemilihan stasiun gempa yang digunakan

#### 4. *Import Data SAC*

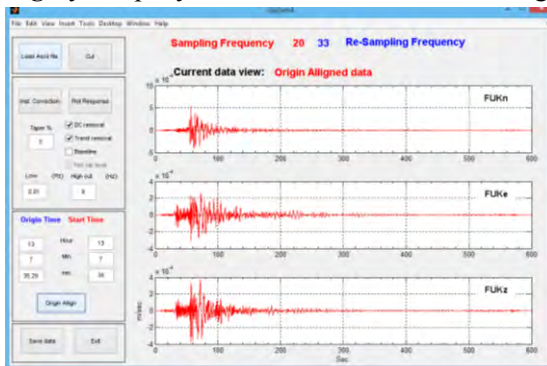
Tahap ini merupakan langkah untuk memasukkan data *waveform* tiga komponen dalam format *SAC* yang digunakan dalam pengolahan program ISOLA-GUI. Jumlah minimal stasiun yang digunakan sebanyak 3 stasiun, akan tetapi hasil yang baik akan didapatkan jika digunakan stasiun yang lebih banyak. . Stasiun yang digunakan sebaiknya berada di seluruh penjuru mata angin (empat kuadran) yang dapat merekam kompresi dan dilatasi episenter gempa. Hal ini bertujuan agar didapatkan hasil momen tensor yang baik dan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Data stasiun 3 komponen kemudian disave dalam bentuk data ASCII untuk tahap pengolahan berikutnya.



Gambar 3. 9 Tampilan SAC *Import* program ISOLA-GUI

### 5. Raw Data Preparation

Dalam proses ini, digunakan data *waveform* ASCII yang kemudian seismogram yang tak terkoreksi dilakukan pengoreksian melalui instrumental correction dan dilakukan *origin align* yaitu penyetaraan waktu awal dari data gempa.

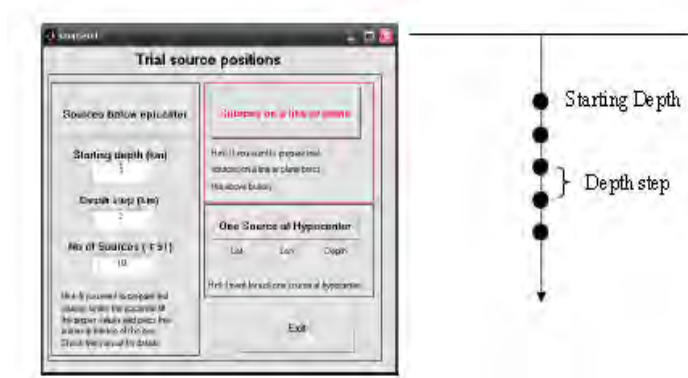


Gambar 3. 10 Proses koreksi data per stasiun dan penyetaraan waktu awal gempa



## 6. Seismic Source Definition

Langkah ini mengasumsikan bahwa hanya terdapat satu sumber pada lokasi *event* dan kedalaman tertentu pada hiposenter. Terdapat 3 kolom yang perlu diisi, yakni *Starting depth*, *Depth step* dan *No. of sources*. Penjelasan terkait dapat dilihat pada gambar dibawah ini

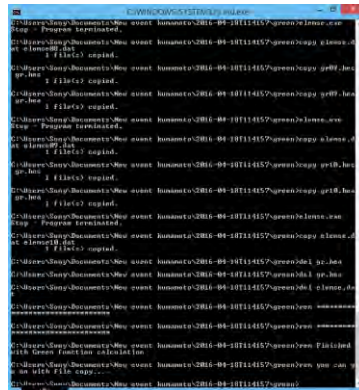


Gambar 3. 11 Definisi sumber tunggal

Menurut Sokos dan Zahrandik (2009) tahap ini digunakan untuk mencari posisi sumber yang optimum yang ditandai dengan kecocokan data *waveform* dan sintetik sebagai perkiraan pertama untuk *centroid*.

## 7. Komputasi Fungsi *Green*

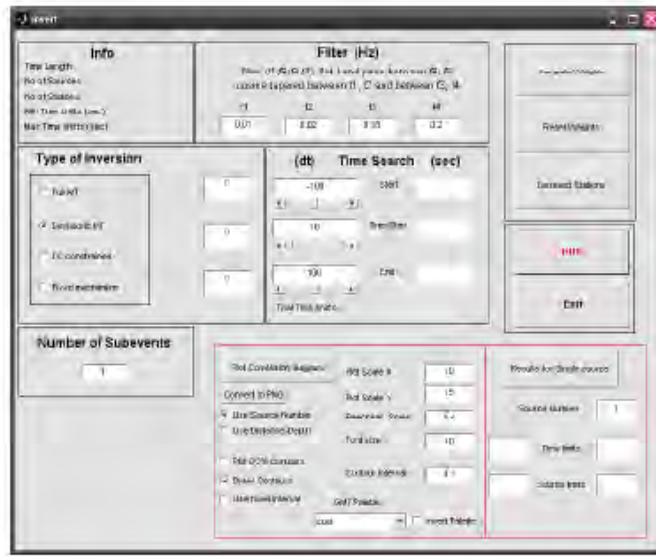
Komputasi fungsi *Green* penting dilakukan agar dapat melangkah ke tahap selanjutnya, yaitu tahap inversi. Tahap pengolahan fungsi *Green* dilakukan menggunakan Fungsi *Green* dan dapat dimonitor melalui *command window* sistem seperti gambar berikut ini



Gambar 3. 12 Proses perhitungan Fungsi *Green* dalam *command prompt*

## 8. Inversi

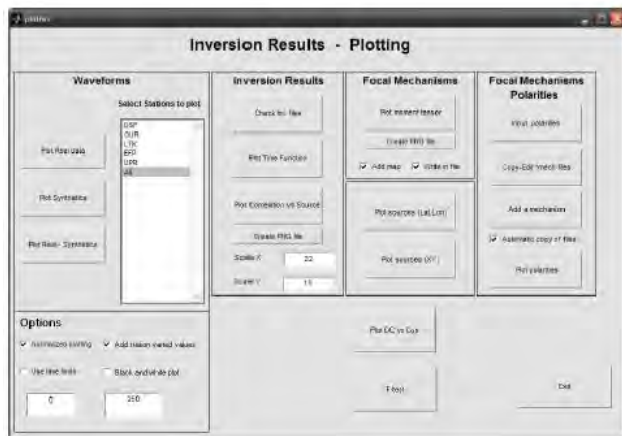
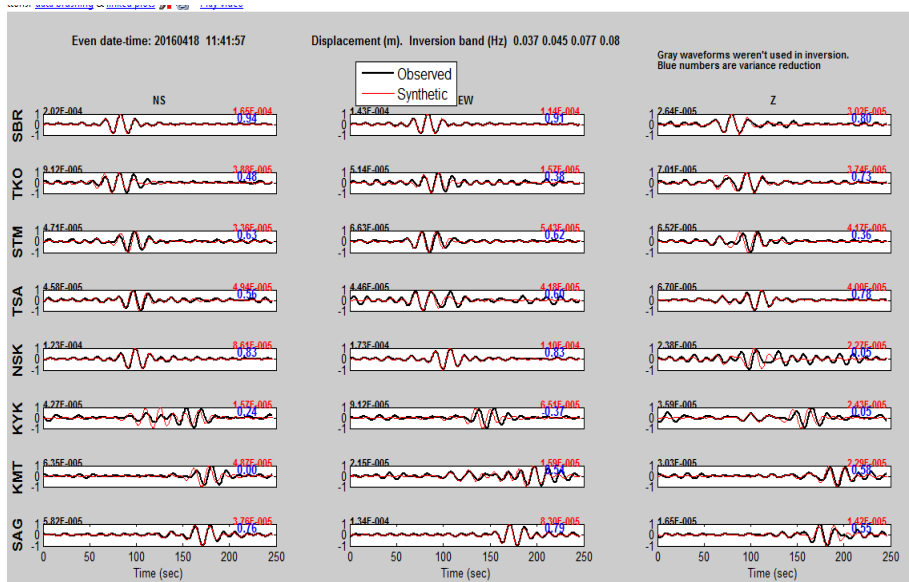
Tahap yang dilakukan sebelum plot hasil CMT adalah proses inversi. Proses inversi digunakan untuk mendapatkan hasil kurva *displacement* data *waveform* dengan data sintetik dan menghasilkan nilai momen tensor berdasarkan analisis *waveform*. Pe-running-an tahap ini akan menghasilkan nilai variasi reduksi. Nilai variasi reduksi digunakan sebagai acuan dalam keakuratan hasil pengolahan data dalam penelitian. Namun sebelumnya perlu dilakukan penentuan parameter filter. Nilai filter merupakan penentu untuk mendapatkan hasil yang bagus dalam *fitting* kurva. Apabila nilai variasi reduksi rendah ( $<0.5$ ) maka dilakukan filtering kembali dengan mengganti nilai filter yang baru atau kembali pada proses pemilihan stasiun, tahap ini terus dilakukan hingga nilai *varred* mendekati nilai 1.



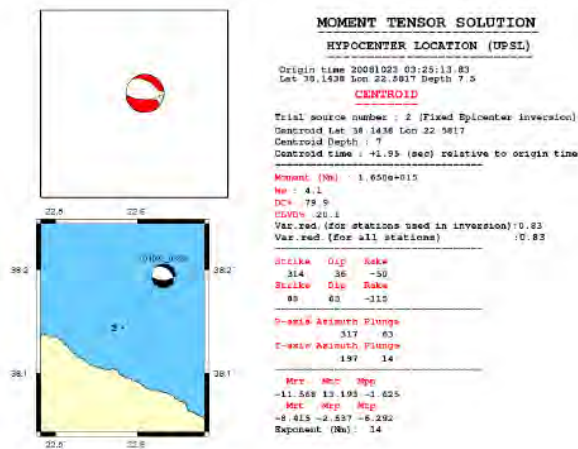
Gambar 3. 13 Tahap inversi dalam penelitian

## 9. Plot Hasil

Tahap terakhir dalam pengolahan data menggunakan program ISOLA-GUI adalah plot hasil pengolahan data. Dalam proses ini didapatkan kurva *displacement waveform* dan sintetik serta solusi momen tensor yang didapatkan termasuk didalamnya hasil *focal mechanism* melalui gambar *beach ball*. Focal mechanism menggambarkan arah gerak patahan yang terjadi pada gempa di wilayah Kumamoto Jepang.

Gambar 3. 14 Tahap *plotting* hasil inversi

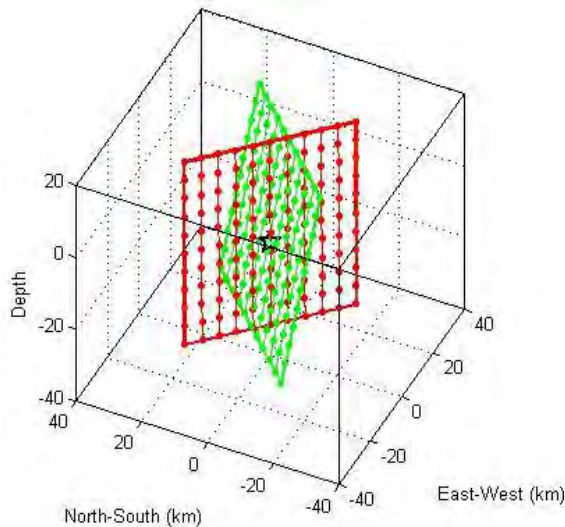
(a)



(b)

Gambar 3. 15 Hasil Inversi *Waveform* (a) *Fitting* kurva *Displacement* data observasi vs data sintetik. (b) hasil solusi *Centroid* Moment Tensor suatu gempa

Langkah selanjutnya yang setelah didapatkan solusi momen tensor adalah penggambaran bidang patahan dan *auxiliary plane* suatu *event* gempa menggunakan program *hplot* seperti gambar di bawah ini:



Gambar 3. 16 *Plotting* bidang patahan dan *auxiliary plane* menggunakan program *hplot*

### 3.4.2 Perhitungan Data

Hasil inversi momen tensor yang telah didapatkan selanjutnya digunakan untuk melakukan perhitungan Panjang, Lebar, Luas sesar dan besar *displacement/slip* gempa.

#### 3.4.2.1 Perhitungan Dimensi Sesar

Perhitungan dimensi sesar disesuaikan dengan pola sesar yang dapat ditunjukkan oleh *beach ball* hasil inversi dari pengolahan data. Parameter yang dicari dalam perhitungan dimensi sesar yaitu Panjang sesar (L), lebar sesar (W) dalam satuan kilometer dan Luas sesar (A) dalam satuan  $\text{km}^2$ . Persamaan yang digunakan dalam perhitungan dimensi sesar adalah (Papazachos et al., 2004):

1. Sesar *Strike Slip*

$$\text{Log } L = 0.59 \text{ Mw} - 2.30 \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\text{Log } A = 0.82 \text{ Mw} - 2.79 \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\text{Log } W = 0.23 \text{ Mw} - 0.49 \dots\dots\dots (3.3)$$
2. Sesar *Dip Slip* di Kontinental
 
$$\text{Log } L = 0.50 \text{ Mw} - 1.86 \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\text{Log } A = 0.78 \text{ Mw} - 2.56 \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\text{Log } W = 0.28 \text{ Mw} - 0.70 \dots\dots\dots (3.6)$$
3. Sesar *Dip Slip* di zona subduksi
 
$$\text{Log } L = 0.55 \text{ Mw} - 2.19 \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\text{Log } A = 0.86 \text{ Mw} - 2.82 \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\text{Log } W = 0.31 \text{ Mw} - 0.63 \dots\dots\dots (3.9)$$

### 3.4.2.2 Perhitungan *Displacement/slip* gempa

Di dalam memperoleh nilai *Displacement/slip* gempa, dilakukan perhitungan yang berkaitan dengan momen seismik gempa melalui persamaan oleh Madlazim (2011) :

$$M_0 = \mu \cdot A \cdot D \dots\dots\dots (3.10)$$

Maka

$$D = \frac{M_0}{\mu \cdot A} \dots\dots\dots (3.11)$$

Dimana D adalah *slip* yang menyebabkan gempa (meter),  $M_0$  adalah momen seismic hasil inversi (Nm), A merupakan luas sesar ( $\text{km}^2$ ) dan  $\mu$  adalah koefisien rigiditas.

## 3.5 Analisa Data dan Pembahasan

Analisa hasil pengolahan data menggunakan program ISOLA-GUI yang dilakukan adalah membahas mengenai momen tensor dan *focal mechanism* gempa. Bentuk *beach ball* yang bervariasi menunjukkan bentuk geometri sesar yang menyebabkan terjadinya gempa. Bentuk geometri sesar tersebut dipengaruhi oleh geologi regional Kumamoto dan

letak hiposenternya. Kemudian dari program *hplot* akan dapat diketahui bidang sesar dan *auxiliary plane* yang membantu untuk mempermudah analisa dan juga program GMT (*Generic Mapping Tools*) untuk memetakan lokasi episenter dari masing-masing *event* dengan bentuk *beach ball*-nya. Dalam penelitian ini akan juga akan dibahas mengenai hubungan antara masing-masing *beach ball* dalam menggambar sesar yang terbentuk di wilayah Kumamoto. Selanjutnya akan dihitung besar *slip* dari masing-masing sesar yang dihasilkan dalam penelitian.

### 3.6 Kesimpulan

Dari hasil analisa momen tensor dan *focal mechanism* gempa di wilayah Kumamoto akan disimpulkan mengenai pola bidang sesar yang terjadi dan besar *slip* sesar gempa di wilayah Kumamoto periode April 2016.



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Data

#### 4.1.1 Data Penelitian

Dilakukan penelitian tentang analisis mekanisme fokus yang terjadi di wilayah Kumamoto Jepang dengan kekuatan gempa  $\geq 5.3$  SR. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan *event* yang terjadi di wilayah Kumamoto Jepang pada periode April 2016 sebagaimana Tabel 4.1:

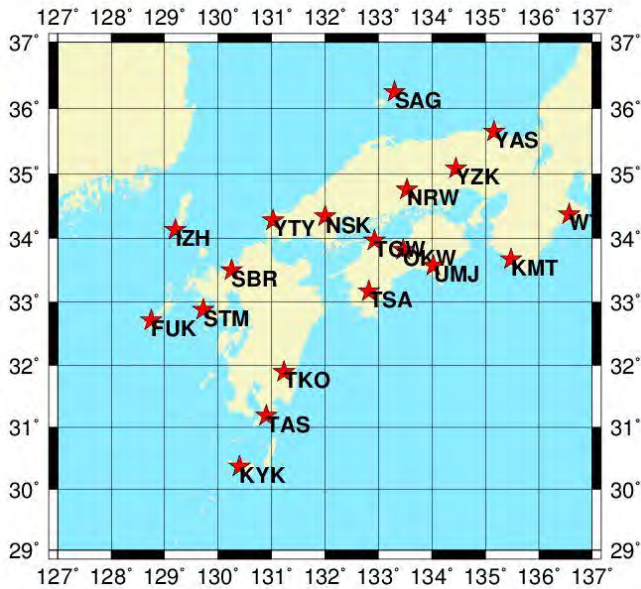
Tabel 4. 1 Data *Event* Kumamoto yang digunakan dalam penelitian

| No | Tanggal    | Waktu       | Lat     | Long     | M <sub>w</sub> | Depth (Km) | Lokasi              |
|----|------------|-------------|---------|----------|----------------|------------|---------------------|
| 1  | 14-04-2016 | 12:26:34.43 | 32.7417 | 130.8087 | 6.5            | 11.39      | Barat Laut Kumamoto |
| 2  |            | 13:07:35.29 | 32.7755 | 130.8495 | 5.8            | 8.26       |                     |
| 3  |            | 15:03:46.45 | 32.7007 | 130.7777 | 6.4            | 6.71       |                     |
| 4  | 15-04-2016 | 16:25:05.47 | 32.7545 | 130.7630 | 7.3            | 12.45      | Barat Laut Kumamoto |
| 5  |            | 16:45:54.45 | 32.8632 | 130.8990 | 5.9            | 10.55      |                     |
| 6  |            | 18:03:10.78 | 32.9638 | 131.0868 | 5.9            | 6.89       |                     |
| 7  |            | 18:55:53.08 | 33.0265 | 131.1910 | 5.8            | 10.89      |                     |
| 8  | 18-04-2016 | 11:41:57.94 | 33.0020 | 131.1998 | 5.8            | 8.64       | Timur Laut Kumamoto |
|    |            |             |         |          |                |            |                     |

Sedangkan data stasiun yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Tabel 4.2 dan Gambar 4.1 :

Tabel 4. 2 Koordinat Stasiun yang digunakan dalam penelitian

| No. | Nama      | Kode | Lattitude | Longitude |
|-----|-----------|------|-----------|-----------|
| 1.  | Fukue     | FUK  | 32.7177   | 128.7572  |
| 2.  | Izuhara   | IZH  | 34.1359   | 129.2066  |
| 3.  | Kamitonda | KMT  | 33.6782   | 135.4899  |
| 4.  | Nagata    | KYK  | 30.3781   | 130.4099  |
| 5.  | Nariwa    | NRW  | 34.7682   | 133.5325  |
| 6.  | Nishiki   | NSK  | 34.3403   | 132.0018  |
| 7.  | Nishitosa | TSA  | 33.1781   | 132.8200  |
| 8.  | Ookawa    | OKW  | 33.8272   | 133.4691  |
| 9.  | Saigo     | SAG  | 36.2553   | 133.3050  |
| 10. | Sefuri    | SBR  | 33.5052   | 130.2530  |
| 11. | Sotome    | STM  | 32.8870   | 129.7237  |
| 12. | Takaoka   | TKO  | 31.8931   | 131.2321  |
| 13. | Tamagawa  | TGW  | 33.9734   | 132.9319  |
| 14. | Tashiro   | TAS  | 31.1946   | 130.9093  |
| 15. | Toyota    | YTY  | 34.2835   | 131.0364  |
| 16. | Umaji     | UMJ  | 33.5795   | 134.0367  |
| 17. | Watarai   | WTR  | 34.3739   | 136.5748  |
| 18. | Yamasaki  | YZK  | 35.0888   | 134.4594  |
| 19. | Yasaka    | YAS  | 35.6570   | 135.1605  |



Gambar 4. 1 Lokasi Stasiun perekam gempa Kumamoto Jepang

## 4.2 Hasil Pengolahan

### 4.2.1 Hasil Momen Skalar

Momen Skalar atau *momen seismic* adalah solusi yang menggambarkan besarnya energi yang dilepaskan oleh gempa bumi. Berdasarkan persamaan 3.10, besar momen seismik sebanding dengan Modulus Geser ( $\mu$ ), *Slip* sesar ( $D$ ) dan luas bidang sesar ( $A$ ) (Madlazim, 2011). Dari hasil pengolahan data menggunakan program ISOLA-GUI didapatkan besarnya momen skalar ( $M_0$ ) untuk masing-masing *event* yang disajikan dalam Tabel 4.3 :

Tabel 4. 3 Hasil perhitungan Momen Skalar gempa Kumamoto Jepang

| No. | Event             | Mag | Momen Skalar (Nm) |                |
|-----|-------------------|-----|-------------------|----------------|
|     |                   |     | ISOLA             | NIED           |
| 1.  | 14/04_12:26:34.43 | 6.5 | $1,402.10^{18}$   | $1,74.10^{18}$ |
| 2.  | 14/04_13:07:35.29 | 5.8 | $1,517.10^{17}$   | $1,27.10^{17}$ |
| 3.  | 14/04_15:03:46.45 | 6.4 | $1,385.10^{18}$   | $1,06.10^{18}$ |
| 4.  | 15/04_16:25:05.47 | 7.3 | $1,936.10^{19}$   | $4,42.10^{19}$ |
| 5.  | 15/04_16:45:55.45 | 5.9 | $0,564.10^{18}$   | $4,33.10^{17}$ |
| 6.  | 15/04_18:03:10.78 | 5.9 | $1,655.10^{17}$   | $1,92.10^{17}$ |
| 7.  | 15/04_18:55:53.08 | 5.8 | $1,457.10^{17}$   | $2,14.10^{17}$ |
| 8.  | 18/04_11:41:57.94 | 5.8 | $1,124.10^{17}$   | $1,87.10^{17}$ |

Pada tabel di atas telah disajikan momen skalar hasil perhitungan menggunakan program ISOLA-GUI dengan hasil dari NIED Jepang. Selanjutnya dilakukan perbandingan untuk mengetahui besar selisih perhitungan peneliti dengan besar nilai momen seismik referensi (NIED Jepang) yang disajikan dalam Tabel 4.4 :

Tabel 4. 4 Perbandingan Hasil Momen Skalar data gempa Kumamoto Jepang

| No. | Momen Skalar (Nm) |                | $\Delta$        |
|-----|-------------------|----------------|-----------------|
|     | ISOLA             | NIED           |                 |
| 1.  | $1,402.10^{18}$   | $1,74.10^{18}$ | $0,348.10^{18}$ |
| 2.  | $1,517.10^{17}$   | $1,27.10^{17}$ | $0,247.10^{17}$ |
| 3.  | $1,385.10^{18}$   | $1,06.10^{18}$ | $0,325.10^{18}$ |
| 4.  | $1,936.10^{19}$   | $4,42.10^{19}$ | $2,484.10^{19}$ |
| 5.  | $0,564.10^{18}$   | $4,33.10^{17}$ | $1,31.10^{17}$  |
| 6.  | $1,655.10^{17}$   | $1,92.10^{17}$ | $0,265.10^{17}$ |
| 7.  | $1,457.10^{17}$   | $2,14.10^{17}$ | $0,683.10^{17}$ |
| 8.  | $1,124.10^{17}$   | $1,87.10^{17}$ | $0,746.10^{18}$ |

Dari kedua tabel yang telah disajikan di atas, hasil perhitungan momen skalar terbesar terdapat pada *event* gempa pada tanggal 15-04-2016 pukul 16:25:05.47 dengan magnitudo gempa 7.3 SR yaitu  $4,42.10^{19}$  Nm. Sedangkan momen skalar terkecil terdapat pada *event* gempa pada tanggal 18-04-2016 pukul 11:41:57.94 dengan magnitudo sebesar 5.8 yaitu  $1,124.10^{17}$ . Terdapat keterkaitan antara Magnitudo dengan Momen Seismik. berdasarkan tabel 4.3, magnitudo memiliki hubungan yang sebanding dengan logaritmik  $M_0$ . Magnitudo merupakan parameter yang memberi gambaran seberapa besar kekuatan gempa. Oleh karena itu, jika nilai  $M_0$  besar maka  $M_w$  juga semakin besar. selain itu, nilai  $M_0$  berhubungan dengan luas *slip* sesar ( $A$ ), seperti pada persamaan (3.10) dimana jika nilai  $M_0$  semakin besar maka luas *slip* sesar gempa juga semakin besar.

#### 4.2.2 Hasil Momen Tensor

Perhitungan momen tensor digunakan untuk menggambarkan arah gaya penyebab gempa bumi. Menurut Setyowidodo dan Santosa (2011), Momen tensor juga dapat digunakan untuk mengetahui model gerak dan karakter sesar penyebab gempa bumi. Besar dan arah gaya penyebab gempa bumi dalam momen tensor digambarkan melalui enam derajat kebebasan. Solusi momen tensor dalam katalog GMT (Global Moment Tensor) tersedia dalam koordinat bola yaitu  $r$ ,  $t$  ( $\theta$ ) dan  $p$  ( $\Phi$ ). Momen tensor umumnya ditulis dengan  $M_{Rt}$  yang berarti komponen gaya yang bergerak kearah sumbu  $r$  dan bekerja pada bidang normal terhadap sumbu  $t$ . pada penelitian ini, pemodelan momen tensor dilakukan dengan menggunakan metode inversi *waveform* tiga komponen. Hasil

perhitungan momen tensor yang didapatkan ditunjukkan pada Tabel 4.5 :

Tabel 4. 5 Momen Tensor untuk Gempa Kumamoto Jepang

| <i>Event</i>          | $M_{33}$ | $M_{22}$ | $M_{11}$ | $M_{31}$ | $M_{32}$ | $M_{21}$ | Exp | Var  |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|------|
| 14/04_12<br>:26:34.43 | 1.323    | 1.071    | -0.774   | -0.088   | 0.038    | 0.456    | 18  | 0.68 |
| 14/04_13<br>:07:35.29 | -0.080   | 1.154    | -0.427   | 0.260    | -0.833   | 0.884    | 17  | 0.93 |
| 14/04_15<br>:03:46.45 | -1.628   | -0.443   | 0.524    | 0.524    | -0.512   | -0.253   | 18  | 0.57 |
| 15/04_16<br>:25:05.47 | 0.152    | -1.132   | 2.226    | -0.045   | -0.757   | -0.214   | 19  | 0.62 |
| 15/04_16<br>:45:55.45 | 0.507    | -0.479   | -0.220   | -0.151   | 0.166    | 0.021    | 17  | 0.59 |
| 15/04_18<br>:03:10.78 | 0.614    | 0.122    | -1.595   | -0.061   | -1.083   | 0.307    | 17  | 0.53 |
| 15/04_18<br>:55:53.08 | 0.101    | 1.611    | -1.121   | -0.228   | 0.148    | 0.346    | 17  | 0.73 |
| 18/04_11<br>:41:57.94 | -0.192   | 1.011    | -1.157   | -0.190   | 0.168    | -0.018   | 17  | 0.66 |

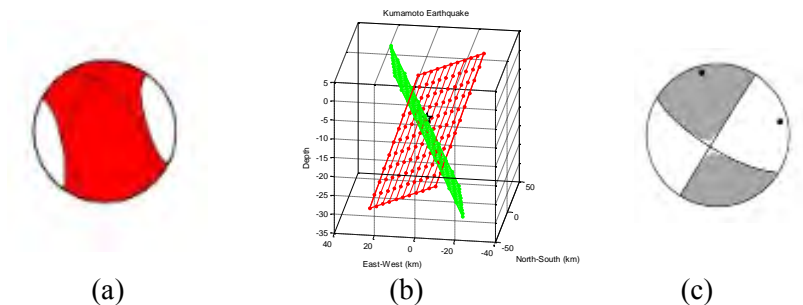
#### 4.2.3 Hasil Mekanisme Fokus Gempa

Hasil solusi inversi momen tensor yang didapatkan akan menghasilkan nilai *strike*, *dip* dan *rake* yang digunakan untuk menganalisa bidang patahan gempa. Solusi inversi momen tensor selalu menghasilkan dua bidang patahan dimana satu bidang merupakan bidang patahan yang sebenarnya dan bidang lain merupakan *auxiliary plane* atau bidang bantu yang tegak lurus satu sama lain (Steith, 2003).

Tabel 4. 6 Bidang Sesar dan *Auxiliary plane* untuk Gempa Kumamoto Jepang

| <i>Event</i>          | Nodal Plane I |            |             | Nodal Plane II |            |             |
|-----------------------|---------------|------------|-------------|----------------|------------|-------------|
|                       | <i>Strike</i> | <i>Dip</i> | <i>Rake</i> | <i>Strike</i>  | <i>Dip</i> | <i>Rake</i> |
| 14/04_12:26:3<br>4.43 | 189           | 48         | 122         | 326            | 51         | 60          |
| 14/04_13:07:3<br>5.29 | 285           | 64         | -22         | 26             | 70         | -152        |
| 14/04_15:03:4<br>6.45 | 359           | 58         | -76         | 154            | 35         | -111        |
| 15/04_16:25:0<br>5.47 | 130           | 74         | 170         | 222            | 81         | 16          |
| 15/04_16:45:5<br>5.45 | 79            | 55         | 76          | 283            | 38         | 109         |
| 15/04_18:03:1<br>0.78 | 183           | 68         | 103         | 331            | 26         | 61          |
| 15/04_18:55:5<br>3.08 | 218           | 79         | -180        | 128            | 90         | -11         |
| 18/04_11:41:5<br>7.94 | 225           | 77         | -179        | 135            | 89         | -13         |

Solusi bidang patahan berupa *strike*, *dip* dan *rake* yang telah didapatkan kemudian digunakan sebagai input hcplot untuk menggambarkan arah bidang patahan. Dari 2 bidang yang digambarkan akan dapat terlihat bidang patahan yang sebenarnya (gambar b). Hasil yang didapatkan disajikan pada Gambar 4.2 :

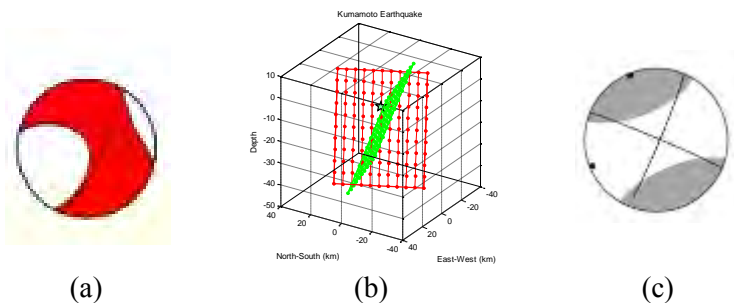


Gambar 4. 2 (a). Bentuk *Beach ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk *Beach ball* dari NIED gempa tanggal 14/04/2016 pukul 12:26:34.43

*Event* gempa pertama terjadi pada tanggal 14/04/2016 pukul 12:26:34. Hasil inversi momen tensor yang dihasilkan adalah pola bidang sesar *oblique* didominasi pola sesar *dip-slip reverse* dan sedikit pola sesar *strike-slip* di bagian atas *beach ball* (gambar 4.2 a). Hasil ini memiliki perbedaan dengan hasil *beach ball* NIED yang menunjukkan pola bidang sesar *strike-slip*. Jika ditinjau dari momen skalar yang dihasilkan, perbedaan keduanya berkisar  $0,348.10^{18}$  Nm. Perbedaan pola bidang sesar yang dihasilkan kemungkinan disebabkan oleh perbedaan jumlah stasiun yang digunakan. Pengolahan data momen tensor oleh NIED menggunakan 3 stasiun sedangkan untuk *event* ini digunakan 10 stasiun. Perbedaan jumlah stasiun yang digunakan untuk inversi momen tensor mempengaruhi polaritas gelombang P yang digunakan serta zona kompresi dan dilatasi pada *beach ball*. Pada gambar 4.2 (b), analisa *hcplot* menunjukkan pola bidang patahan ditunjukkan oleh bidang berwarna hijau dengan *auxiliary plane* berwarna merah. Dari analisa *hcplot* juga diketahui jarak hiposenter dengan bidang pertama sebesar 3.31 Km dan dengan bidang kedua sebesar 3.2 Km. jarak



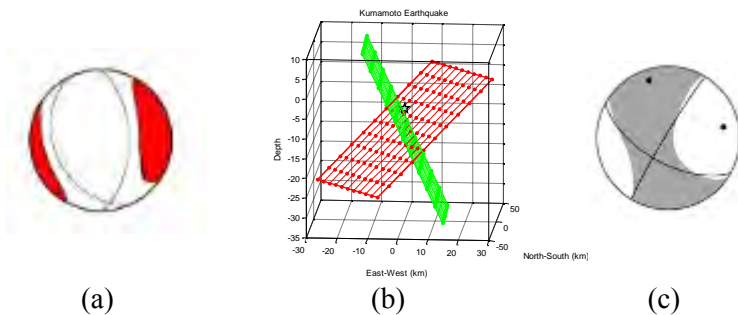
antara hiposenter dan *centroid* diketahui sebesar 3.31 Km. jika dianalisa dari parameter sesar, didapatkan nilai *strike* sebesar  $189^\circ$ , *dip* sebesar  $48^\circ$ , dan *rake* sebesar  $122^\circ$ , menunjukkan bahwa arah pergerakan sesar berada pada arah  $189$  dari arah utara dengan kemiringan patahan sebesar  $48$  yang terlihat pada nodal berwarna hijau dan *rake* bernilai positif ( $100^\circ$ ) menunjukkan dominasi sesar *dip slip reverse fault*.



Gambar 4. 3 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk *Beach Ball* dari NIED event gempa tanggal 14/04/2016 pukul 13:07:35.29

Gempa yang terjadi di barat laut Kumamoto pada tanggal tanggal 14/04/2016 pukul 13:07:35.29 menunjukkan hasil pola bidang sesar yang terbentuk adalah sesar *strike slip* dari hasil inversi momen tensor. Pada gambar 4.3 (a) dan (c), diketahui bahwa pola bidang sesar yang dihasilkan dari pengolahan data ISOLA dan NIED memiliki bentuk yang sama. Dengan varian reduksi 0.93, maka dapat dipastikan sesar yang terbentuk adalah sesar *strike slip* murni (mendatar). Hasil analisa hc plot menunjukkan jarak hiposenter pada bidang pertama sebesar 4.53 Km sedangkan terhadap bidang kedua sebesar 3.5 Km. adapun jarak hiposenter terhadap

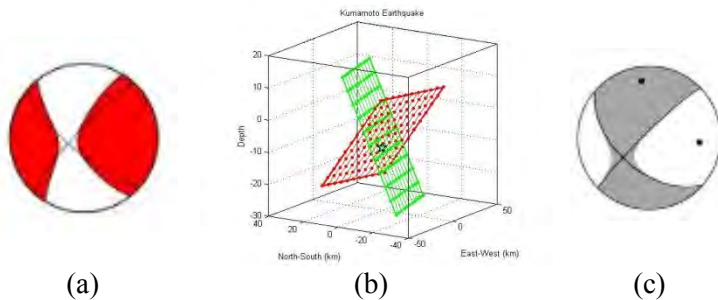
*centroid* sebesar 1.26 Km. pada gambar 4.3 (b), diketahui bahwa bidang patahan ditunjukkan oleh bidang berwarna hijau sedangkan *auxiliary plane* ditunjukkan oleh bidang berwarna merah. jika dianalisa dari parameter sesar, didapatkan nilai *strike* sebesar  $285^{\circ}$ , *dip* sebesar  $64^{\circ}$ , dan *rake* sebesar  $-22^{\circ}$ , menunjukkan bahwa arah pergerakan sesar berada pada arah  $285^{\circ}$  dari arah utara dengan kemiringan patahan sebesar  $64^{\circ}$  yang terlihat pada nodal berwarna hijau.



Gambar 4. 4 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk *Beach Ball* dari NIED *event* gempa tanggal 14/04/2016 pukul 15:03:46.45

Gempa ketiga terjadi di barat laut Kumamoto pada tanggal tanggal 14/04/2016 pukul 15:03:46.45 menunjukkan hasil pola bidang sesar yang terbentuk dari hasil inversi momen tensor adalah sesar sesar normal. Pada gambar 4.4 (a) dan (c), diketahui bahwa pola bidang sesar yang dihasilkan dari pengolahan data ISOLA dan NIED adalah berbeda. Hasil momen tensor oleh NIED berupa sesar *strike slip*. Perbedaan hasil ini dapat disebabkan karena hanya terdapat 3 stasiun gempa yang merekam *event* ini. Disamping itu, jarak stasiun perekam dengan pusat gempa juga dapat mempengaruhi hasil momen tensor, akibatnya pola sesar yang dihasilkan kurang

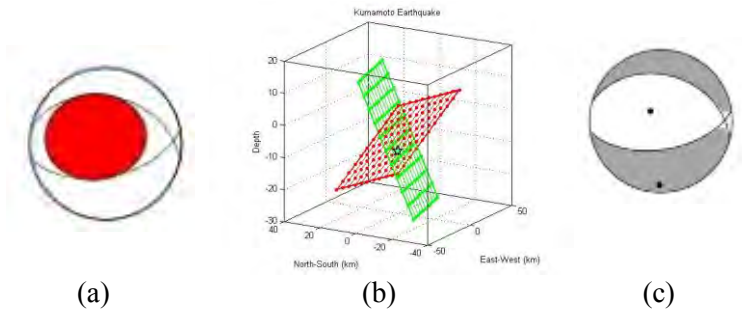
akurat. Hasil analisa *hc* plot menunjukkan jarak hiposenter pada bidang pertama sebesar 2.85 Km sedangkan terhadap bidang kedua sebesar 4.76 Km. pada gambar 4.3 (b), diketahui bahwa bidang patahan ditunjukkan oleh bidang berwarna hijau sedangkan *auxiliary plane* ditunjukkan oleh bidang berwarna merah . jika dianalisa dari parameter sesar, didapatkan nilai *strike* sebesar  $359^\circ$ , *dip* sebesar  $58^\circ$ , dan *rake* sebesar  $-76^\circ$ , menunjukkan bahwa arah pergerakan sesar berada pada arah  $359^\circ$  dari arah utara dengan kemiringan patahan sebesar  $58^\circ$  yang terlihat pada nodal berwarna hijau dan *rake* bernilai negatif ( $-76^\circ$ ) menunjukkan dominasi sesar *dip slip* normal *fault*.



Gambar 4. 5 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk *Beach Ball* dari NIED event gempa tanggal 15/04/2016 pukul 16:25:05.47

Gempa selanjutnya terjadi di barat laut Kumamoto pada tanggal tanggal 15/04/2016 pukul 16:25:05.47 menunjukkan hasil pola bidang sesar yang terbentuk adalah sesar *strike slip* dari hasil inversi momen tensor. Pada gambar 4.3 (a) dan (c), diketahui bahwa pola bidang sesar yang dihasilkan dari pengolahan data ISOLA dan NIED memiliki bentuk yang hampir sama dimana keduanya menghasilkan bentuk sesar

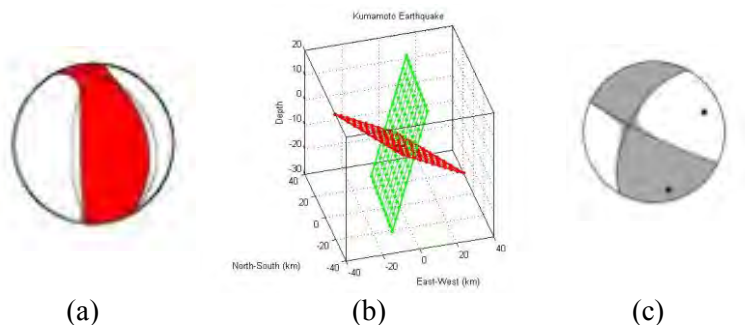
*strike slip*. Akurasi bentuk *beach ball* yang didapatkan adalah 0.61 berdasarkan nilai *Varred*. Hasil analisa *hc* plot menunjukkan jika jarak hiposenter pada bidang pertama sebesar 1.4 Km sedangkan terhadap bidang kedua sebesar 0.87 Km dan jarak antara hiposenter dengan *centroid* diketahui sebesar 4.55 km. Pada gambar 4.3 (b), diketahui bahwa bidang patahan ditunjukkan oleh bidang berwarna hijau sedangkan *auxiliary plane* ditunjukkan oleh bidang berwarna merah. jika dianalisa dari parameter sesar, didapatkan nilai *strike* sebesar  $130^\circ$ , *dip* sebesar  $74^\circ$ , dan *rake* sebesar  $170^\circ$ , menunjukkan bahwa arah pergerakan sesar berada pada arah 189 dari arah utara dengan kemiringan patahan sebesar 48 yang terlihat pada nodal berwarna hijau.



Gambar 4. 6 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk *Beach Ball* dari NIED event gempa tanggal 15/04/2016 pukul 16:45:55.45

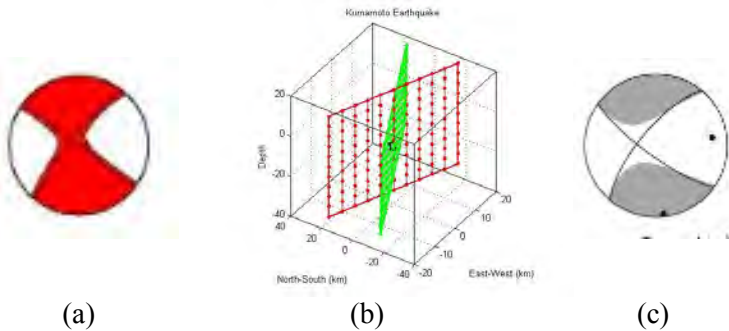
*Event* Gempa yang terjadi di barat laut Kumamoto pada tanggal 15/04/2016 pukul 16:45:55.45 menunjukkan hasil pola bidang sesar yang terbentuk adalah pola sesar naik (*reverse fault*) dari hasil inversi momen tensor. Pada gambar 4.3 (a) dan (c), diketahui bahwa pola bidang sesar yang

dihasilkan dari pengolahan data ISOLA dan NIED berbeda, dimana hasil pengolahan inversi momen tensor ISOLA berupa sesar *reverse* sedangkan hasil NIED didapatkan sesar normal atau sesar turun. Perbedaan ini dapat disebabkan karena stasiun yang merekam gempa terletak jauh dari pusat sumber gempa. Hasil analisa *hc* plot menunjukkan jarak hiposenter pada bidang pertama sebesar 2.92 Km sedangkan terhadap bidang kedua sebesar 3.55 Km. pada gambar 4.3 (b), diketahui bahwa bidang patahan ditunjukkan oleh bidang berwarna hijau sedangkan *auxiliary plane* ditunjukkan oleh bidang berwarna merah. jika dianalisa dari parameter sesar, didapatkan nilai *strike* sebesar  $79^\circ$ , *dip* sebesar  $55^\circ$ , dan *rake* sebesar  $76^\circ$ , menunjukkan bahwa arah pergerakan sesar berada pada arah  $79^\circ$  dari arah utara dengan kemiringan patahan sebesar  $55^\circ$  yang terlihat pada nodal berwarna hijau dan *rake* bernilai positif ( $76^\circ$ ) menunjukkan dominasi sesar *dip slip reverse fault*.



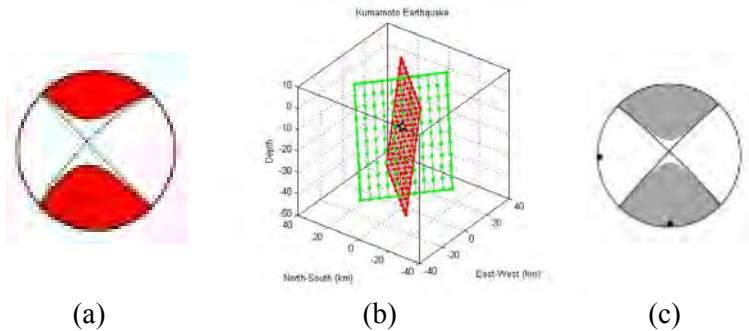
Gambar 4. 7 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk *Beach Ball* dari NIED gempa tanggal 15/04/2016 pukul 18:03:10.78

Pada tanggal 15/04/2016 pukul 18:03:10.78 di timur laut Kumamoto terjadi *event* gempa dimana hasil pola bidang sesar yang terbentuk adalah sesar miring (*oblique*) dari hasil inversi momen tensor. Pola sesar yang dihasilkan merupakan gabungan dari sesar *reverse* dan *strike slip*. Pada gambar 4.3 (a) dan (c), diketahui bahwa pola bidang sesar yang dihasilkan dari pengolahan data ISOLA dan NIED memiliki bentuk yang berbeda. Hasil pengolahan NIED berupa sesar mendatar atau *strike slip*. Perbedaan hasil yang ditunjukkan dapat disebabkan karena stasiun yang merekam gempa terletak jauh dari pusat sumber gempa. pada gambar 4.3 (b), diketahui bahwa bidang patahan ditunjukkan oleh bidang berwarna hijau sedangkan *auxiliary plane* ditunjukkan oleh bidang berwarna hijau. jika dianalisa dari parameter sesar, didapatkan nilai *strike* sebesar  $183^{\circ}$ , *dip* sebesar  $68^{\circ}$ , dan *rake* sebesar  $103^{\circ}$ , menunjukkan bahwa arah pergerakan sesar berada pada arah  $183^{\circ}$  dari arah utara dengan kemiringan patahan sebesar  $68^{\circ}$  yang terlihat pada nodal berwarna hijau dan *rake* bernilai positif ( $103^{\circ}$ ) menunjukkan dominasi sesar *dip slip reverse fault* dengan kombinasi sesar mendatar.



Gambar 4. 8 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk *Beach Ball* dari NIED gempa tanggal 15/04/2016 pukul 18:55:53.08

Gempa yang terjadi di timur laut Kumamoto pada tanggal 15/04/2016 pukul 18:55:53.08 menunjukkan hasil pola bidang sesar yang terbentuk adalah sesar *strike slip* dari hasil inversi momen tensor. Pada gambar 4.3 (a) dan (c), diketahui bahwa pola bidang sesar yang dihasilkan dari pengolahan data ISOLA dan NIED memiliki bentuk yang sama. Dengan varian reduksi 0.73, menunjukkan bahwa sesar yang dihasilkan telah cukup akurat. Hasil analisa *hc* plot menunjukkan jarak hiposenter pada bidang pertama sebesar 2.23 Km sedangkan terhadap bidang kedua sebesar 2.11 Km. sedangkan jarak hiposenter terhadap *centroid* diketahui sebesar 2.89 Km. pada gambar 4.3 (b), diketahui bahwa bidang patahan ditunjukkan oleh bidang berwarna hijau sedangkan *auxiliary plane* ditunjukkan oleh bidang berwarna merah . jika dianalisa dari parameter sesar, didapatkan nilai *strike* sebesar  $218^{\circ}$ , *dip* sebesar  $29^{\circ}$ , dan *rake* sebesar  $-180^{\circ}$ , menunjukkan bahwa arah pergerakan sesar berada pada arah  $218^{\circ}$  dari arah utara dengan kemiringan patahan sebesar  $29^{\circ}$  yang terlihat pada nodal berwarna hijau.



(a) (b) (c)  
 Gambar 4. 9 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (c). Bentuk *Beach Ball* dari NIED gempa tanggal 18/04/2016 pukul 11:41:57.94

Gempa yang terjadi di timur laut Kumamoto pada tanggal 18/04/2016 pukul 11:41:57.94 menunjukkan hasil pola bidang sesar yang terbentuk adalah sesar *strike slip* dari hasil inversi momen tensor. Pada gambar 4.3 (a) dan (c), diketahui bahwa pola bidang sesar yang dihasilkan dari pengolahan data ISOLA dan NIED memiliki bentuk yang sama. Hasil analisa *hc* plot menunjukkan jarak hiposenter pada bidang pertama sebesar 2.5 Km sedangkan terhadap bidang kedua sebesar 2.36 Km. pada gambar 4.3 (b), diketahui bahwa bidang patahan ditunjukkan oleh bidang berwarna merah sedangkan *auxiliary plane* ditunjukkan oleh bidang berwarna hijau . jika dianalisa dari parameter sesar, didapatkan nilai *strike* sebesar  $135^{\circ}$ , *dip* sebesar  $89^{\circ}$ , dan *rake* sebesar  $-13^{\circ}$ , menunjukkan bahwa arah pergerakan sesar berada pada arah  $135^{\circ}$  dari arah utara dengan kemiringan patahan sebesar  $89^{\circ}$  yang terlihat pada nodal berwarna hijau.



#### 4.2.4 Hasil *Slip* Sesar Gempa

Setelah diketahui pola bidang patahan yang terjadi pada *event* gempa di Kumamoto, kemudian dilakukan perhitungan besar *slip* yang terjadi selama gempa bumi berlangsung. *Slip* merepresentasikan panjang pergeseran/dislokasi bidang patahan pada saat terjadi gempa. Besar *slip* yang didapatkan dari penelitian ini disajikan dalam Tabel 4.7 :

Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan *Displacement* gempa bumi Kumamoto Jepang

| No | <i>Event</i>   | M <sub>w</sub> | Depth (Km) | L (Km) | W (Km)  | A (Km <sup>2</sup> ) | D (m)   |
|----|----------------|----------------|------------|--------|---------|----------------------|---------|
| 1. | 14/04_12:26:34 | 6.5            | 11.39      | 24.547 | 13.1825 | 323.593              | 67.6083 |
| 2. | 14/04_13:07:35 | 5.8            | 8.26       | 13.243 | 6.98232 | 92.4698              | 22.5943 |
| 3. | 14/04_15:03:46 | 6.4            | 6.71       | 21.877 | 12.3594 | 270.395              | 57.8096 |
| 4. | 15/04_16:25:05 | 7.3            | 12.45      | 101.62 | 15.4525 | 1570.36              | 236.592 |
| 5. | 15/04_16:45:55 | 5.9            | 10.55      | 12.302 | 8.9536  | 110.154              | 26.4241 |
| 6. | 15/04_18:03:10 | 5.9            | 6.89       | 12.302 | 8.9536  | 110.154              | 26.4241 |
| 7. | 15/04_18:55:53 | 5.8            | 10.89      | 13.243 | 6.98232 | 92.4698              | 22.5943 |
| 8. | 18/04_11:41:57 | 5.8            | 8.64       | 13.243 | 6.98232 | 92.4698              | 22.5943 |

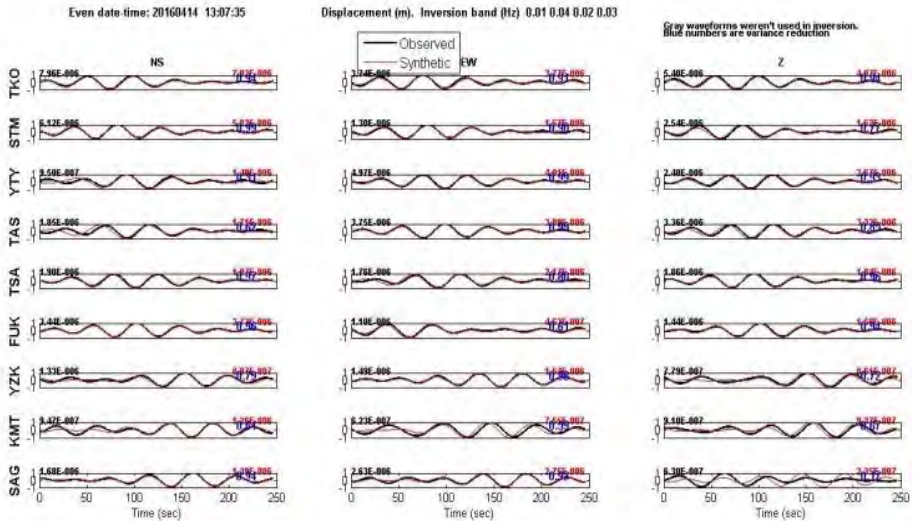
#### 4.3 Pembahasan

Dalam penelitian ini telah dilakukan analisa mengenai gempa bumi Jepang yang terjadi di prefetur Kumamoto wilayah pulau Kyushu Jepang. Pusat gempa bumi dalam penelitian ini berada di darat dengan magnitudo yang lebih  $M \geq 5.8$  SR. Data gempa bumi yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pada periode april 2016 dimana pada periode tersebut terdapat gempa berkekuatan 7.3 SR di wilayah Kumamoto Jepang. Dalam penelitian ini juga disajikan analisa data gempa yang terjadi sebelum dan sesudah gempa utama

pada tanggal 15 April 2016. Data-data gempa tersebut kemudian digunakan untuk menghitung besarnya momen tensor gempa.

#### **4.3.1 Momen Tensor**

Nilai momen tensor yang didapatkan dari penelitian ini berasal dari hasil inversi *waveform* tiga komponen (NS, EW dan Vertikal). Momen tensor digunakan untuk menggambarkan arah gaya penyebab gempa bumi. Solusi momen tensor berupa 6 komponen double couple yang kemudian digunakan untuk mendapatkan parameter-parameter bidang patahan dan digambarkan dalam bentuk *beach ball* sehingga dapat diketahui jenis sesar penyebab gempa bumi. Proses inversi yang dilakukan adalah dengan menggunakan metode iterasi dekonvolusi untuk *fitting waveform* data seismogram dan data sintetik hasil inversi. Hasil inversi telah dikatakan baik apabila *fitting waveform* cocok atau saling tumpang tindih satu sama lain.



Gambar 4. 10 Hasil Inversi *waveform* data seismogram dengan data sintetik pada *event* gempa tanggal 14/04/2016 pukul 13:07:35.29

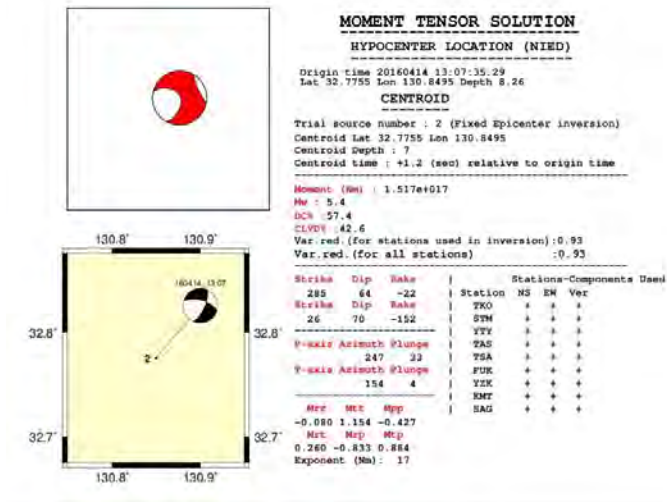
Pada gambar 4.10, terdapat dua kurva yang merupakan kurva data observasi seismogram gempa berwarna hitam dan data seismogram sintetik berwarna merah. Data seismogram sintetik merupakan hasil dari perhitungan fungsi *Green*. Secara umum fungsi *Green* merupakan penggabungan dari fungsi respon, efek proses perambatan dengan unit impulsive dan/atau gaya. Fungsi *Green* dapat melakukan estimasi dari fungsi waktu sumber sehingga dari estimasi tersebut dapat diketahui besar momen tensor hasil pemodelan. Kecocokan kurva ditentukan oleh nilai varian reduksi. Apabila varian reduksi bernilai satu, artinya kecocokan kurva seismogram obeservasi dengan seismogram sintetik adalah sempurna atau dapat dikatakan kedua kurva berhimpit penuh. Semakin kecil

nilai varian reduksinya, maka tingkat kecocokannya juga makin rendah. Jika hal itu terjadi, maka pengolahan data diulangi dengan cara mengganti/menghapus komponen stasiun yang menunjukkan respon kurang baik kemudian diulangi kembali perhitungan fungsi *Green* atau mengubah nilai-nilai filter pada tahap inversi hingga didapatkan hasil yang cukup baik.

*Event* gempa pada gambar 4.10 menghasilkan nilai varian reduksi untuk tiap komponen stasiun pada *event* ini berkisar antara 0.17-0.98 yang ditunjukkan oleh angka di pojok kanan atas tiap komponen. Secara keseluruhan, nilai varian reduksi yang didapatkan tiap komponen terbilang baik untuk hasil *fitting* kurva, hanya terdapat 2 komponen yang memiliki nilai varian reduksi rendah, yaitu 0.17 dan 0.31. Akan tetapi nilai varian reduksi yang dijadikan sebagai acuan adalah nilai varian reduksi total yang merupakan akumulasi dari nilai-nilai varian reduksi tiap komponen. Dapat dilihat antara kurva seismogram observasi dengan seismogram sintetik adalah cocok dan saling berhimpit.

Nilai varian reduksi dipengaruhi oleh proses filtering yang dilakukan pada tahap inversi. Inversi yang digunakan dalam program ISOLA-GUI adalah *Deviatoric Moment Tensor Inversion* yaitu proses inversi untuk menghitung komponen dasar momen tensor serta menggunakan DC (*Double Couple*) dan CLVD (*Compensated Linier Vector Dipole*). Menurut Sokos dan Zahradnik (2009), kedua metode inversi tersebut merupakan metode yang paling baik yang terdapat pada program ISOLA-GUI. Selain itu, sifat elastik dan non-elastik dari medium yang dilewati oleh gelombang sumber gempa juga mempengaruhi hasil *fitting* kurva dalam proses inversi (Stein and Wysession, 2003).

Tahap inversi yang dilakukan akan dihasilkan solusi momen tensor seperti gambar berikut ini :



Gambar 4. 11 Hasil Solusi untuk momen tensor untuk gempa bumi pada tanggal 14/04/2016 pukul 13:07:35.29

Berdasarkan gambar diatas, didapatkan letak *centroid* berada pada kedalaman 7 km, berjarak 1.26 dari hiposenter gempa. CMT terjadi setelah 1.2 sekon setelah terjadinya gempa di hiposenter. Prosentase DC menggambarkan sesar yang menyebabkan terjadinya gempa bumi adalah system *double couple* atau kopel ganda. Dari hasil inversi didapatkan prosentase DC sebesar 57.4%, artinya lebih dari 50% kemungkinan gempa bumi yang terjadi disebabkan oleh sesar *strike slip*. Hasil ini telah sesuai dengan pola sesar yang dihasilkan oleh NIED, IRIS dan USGS.

Besar dan arah momen tensor pada *event* gempa diatas tersaji dalam koordinat bola, yaitu  $r$ ,  $t$  ( $\theta$ ) dan  $p$  ( $\Phi$ ).

Didapatkan  $M_{rr} = M_{zz} = -0.080.10^{17}$  Nm,  $M_{tt} = M_{xx} = 1.154.10^{17}$  Nm,  $M_{pp} = M_{yy} = -0.427.10^{17}$  Nm,  $M_{rt} = M_{xz} = 0.26.10^{17}$  Nm,  $M_{rp} = M_{xy} = -0.833.10^{17}$  Nm, dan  $M_{tp} = M_{yz} = 0.884.10^{17}$  Nm. Keenam komponen momen tensor tersebut menggambarkan besar dan arah gaya yang bekerja pada pusat sumber gempa bumi. Hasil yang didapatkan menunjukkan gaya terbesar terdapat pada arah  $\theta$  atau  $t$  yang bersesuaian dengan arah utara.

Kualitas hasil inversi dapat diketahui dari nilai Varian reduksi hasil *fitting waveform* data observasi seismogram dan *waveform* sintetik yang didapatkan. Keduanya memiliki keterkaitan yaitu semakin tinggi tingkat kecocokan *fitting waveform* maka semakin tinggi pula nilai varian reduksinya (Countant, 1989). Nilai VR (Varian Reduksi) untuk *event* pada gambar 4.11 didapatkan sebesar 0.93 atau 93%. Dari *event* gempa bumi lain yang digunakan dalam penelitian didapatkan nilai VR sebesar 0.53-0.73. nilai varian reduksi lebih dari 0.5 atau 50% dianggap telah memenuhi syarat kevalidan untuk menghasilkan momen tensor yang akurat dan berkualitas baik.

Disamping momen tensor, dari hasil inversi momen tensor juga didapatkan nilai *strike*, *dip* dan *rake* yang menyatakan arah bidang patahan suatu gempa. solusi inversi menghasilkan dua nodal parameter bidang patahan, satu nodal merupakan bidang patahan yang sebenarnya, sedangkan bidang lainnya disebut *auxiliary plane* yang merupakan bidang bantu. Keduanya saling tegak lurus sama lain. *Strike* adalah sudut yang menyatakan arah lintasan garis sesar dipermukaan yang diukur dari arah utara. Adapun *dip* menyatakan sudut kemiringan sesar diukur dari permukaan

bumi. Sedangkan *rake* adalah sudut yang menggambarkan arah pergerakan *slip*.

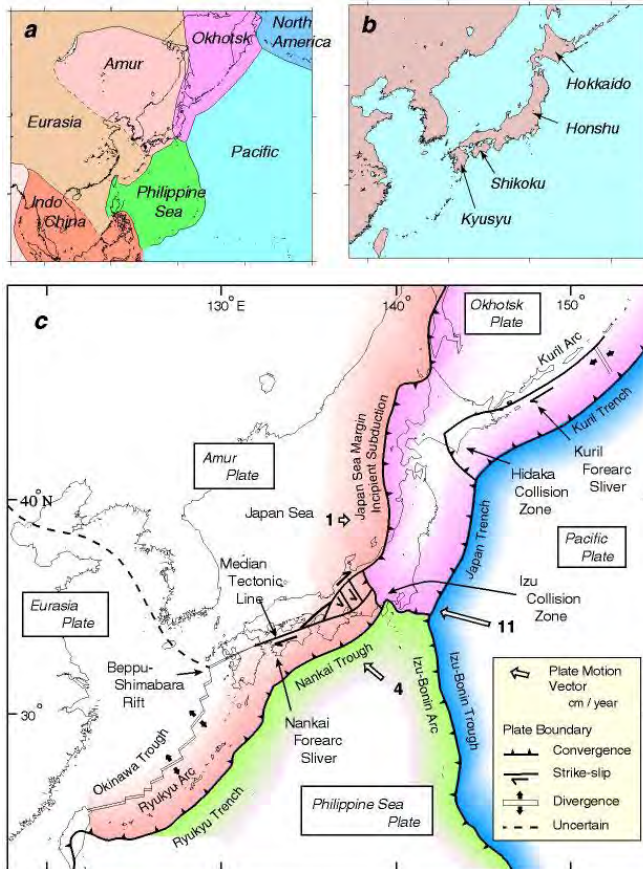
Hasil momen tensor gempa bumi yang didapatkan menggunakan Program ISOLA memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan hasil dari NIED Jepang. Pengolahan data oleh NIED hanya menggunakan 3 stasiun, sedangkan dengan program ISOLA menggunakan lebih dari 3 stasiun untuk inversi *waveform*. Selain itu, tiga komponen seismogram sekaligus dari gelombang P dan gelombang S digunakan dalam pengolahan data menggunakan ISOLA. Metode inversi dengan menggunakan *waveform* tiga komponen menghasilkan informasi terkait *centroid*, dimana *centroid* dan *origin time* suatu gempa saling berkaitan satu sama lain, sedangkan pengolahan data menggunakan waktu tempuh tidak menghasilkan informasi terkait *centroid*. Dengan keunggulan tersebut, hasil yang didapatkan menggunakan program ISOLA dapat dikatakan lebih valid.

#### **4.3.2 Mekanisme Fokus Gempa**

Mekanisme fokus gempa bumi direpresentasikan melalui bola fokus atau yang disebut dengan *beach ball*. Hasil inversi pengolahan data menggunakan program ISOLA didapatkan pola sesar pada gempa bumi Kumamoto Jepang periode April 2016 adalah *dip slip* normal, *dip slip reverse*, sesar *oblique* dan *strike slip*. Bentuk sesar yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi Jepang. Jepang dikelilingi oleh 4 lempeng utama dunia yang menyebabkan wilayah Jepang didominasi oleh zona subduksi yang disebabkan oleh batas lempeng konvergen. Zona subduksi menyebabkan terbentuknya beberapa palung laut diantaranya *Jepang Trench*, *Nankai Trough*, *Kyushu Trench* dan *Ryukyu*

*Trench*. (Zhao et al., 2011). Lokasi gempa bumi dalam penelitian ini terletak di prefektur Kumamoto, kepulauan Kyushu di bagian selatan Jepang. Gempa Kumamoto merupakan gempa yang terjadi akibat *crustal Fault*, yaitu patahan yang terdapat pada litosfer benua yang menyebabkan terjadinya gempa. gempa yang terjadi akibat *crustal fault* dikhawatirkan memiliki dampak yang membahayakan terutama apabila gempa tersebut termasuk dalam kategori gempa dangkal. Gempa bumi Kumamoto pada 15 April 2016 pukul 16:25:05.47 diidentifikasi sebagai gempa utama dalam penelitian ini dengan kekuatan lebih dari 7 SR. adapun gempa-gempa sebelumnya dikategorikan sebagai gempa Foreshock dan gempa-gempa sesudahnya disebut sebagai aftershock. Baik gempa foreshock maupun aftershock yang terjadi memiliki kekuatan yang besar, yakni dengan magnitudo lebih dari sama dengan 5.8 SR.

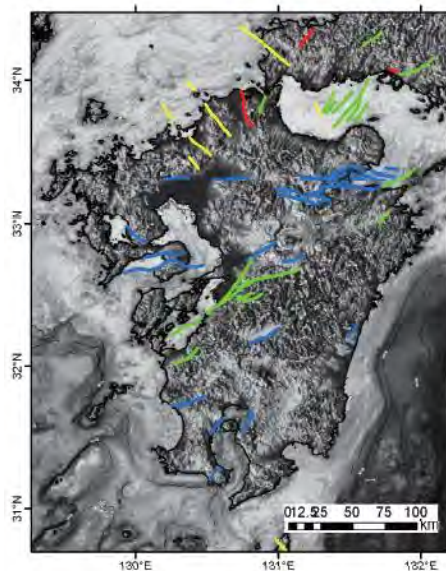




Gambar 4. 12 (a) lempeng tektonik yang mengelilingi Jepang (b) empat pulau utama di Jepang yang merepresentasikan system busur Jepang (c) batas lempeng sistem busur Jepang (Taira, 2001)

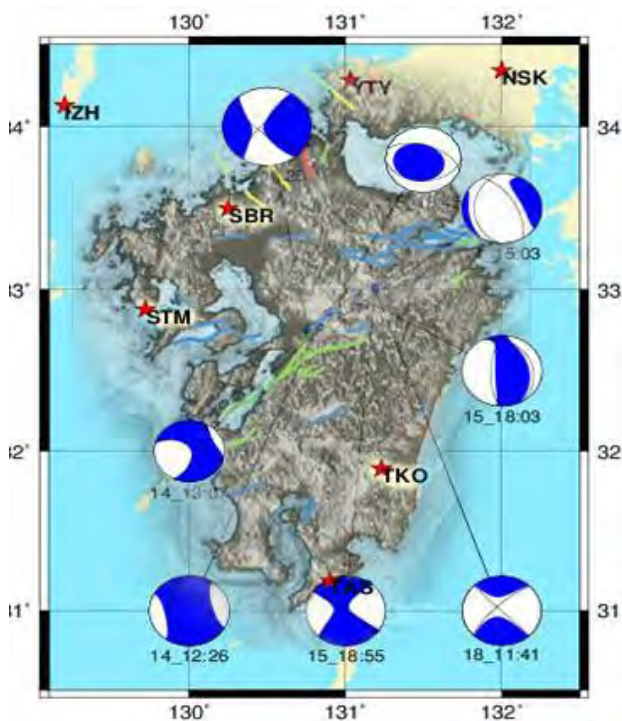
Ditinjau dari geologi regional, wilayah Kyushu memiliki *setting* tektonik aktif yang kompleks dan dinamis, dimana gempa yang terjadi dapat disebabkan oleh beragam tipe sesar. Di wilayah lepas pantai Kyushu, gempa yang

terjadi menunjukkan pola sesar naik akibat penunjaman/subduksi pada palung Nankai/Ryukyu. Adapun pola sesar normal terdapat di pusat Kyushu sebagai akibat adanya deformasi BSG (Beppu-Shimabara Graben). pola sesar sinistral (*left lateral strike slip*) dapat ditemukan di barat laut dan timur laut Graben Kagoshima, Kyushu bagian Utara dan Barat Laut Kyushu, pergerakan ini bersesuaian dengan regangan geser GPS. Sesar aktif yang terdapat pada wilayah Kyushu ditunjukkan oleh Gambar 4.13 :



Gambar 4. 13 patahan aktif di wilayah Kyushu berdasarkan warna garis (hijau = dextral, biru = normal, merah = reverse, kuning = sinistral)  
(<http://www.aist.go.jp>)

Gambar 4.13 apabila dikorelasikan dengan mekanisme fokus hasil penelitian pada gempa Kumamoto Jepang akan didapatkan hasil seperti pada Gambar 4. 14 :



Gambar 4. 14 *beach ball* yang merepresentasikan mekanisme fokus gempa pada peta geologi Kyushu.

Pola sesar hasil inversi yang didapatkan didominasi oleh sesar mendatar (*strike-slip fault*). Hasil ini telah bersesuaian dengan kondisi geologi Kyushu, dimana lokasi penelitian yakni barat laut dan timur laut Kumamoto merupakan zona yang dilewati oleh MTL (*Median Tectonic Line*) yang merupakan batas geologi yang mengalami pergerakan secara *right lateral* (Matsumoto et al., 2015). Ini artinya gempa yang terjadi di barat laut dan timur laut Kumamoto disebabkan oleh sesar *dextral* (*right lateral strike*

*slip*). Teori ini diperkuat dengan kajian momen tensor IRIS yang menyatakan bahwa gempa yang terjadi disebabkan oleh pergerakan *dextral strike slip* yang mengarah kearah timur laut-barat daya. Sedangkan menurut USGS, berdasarkan hasil mekanisme fokus dan kedalaman yang dangkal, dapat disimpulkan jika gempa gempa Kumamoto terjadi pada patahan di darat (*crustal fault*) akibat lempeng laut Filipina mensubduksi di bawah Jepang dengan arah barat laut sehingga menggerakkan lempeng Eurasia. *Event* yang menunjukkan hasil *strike slip* antara lain *event* pada tanggal 14/04/2016 pukul 13:07:35.29, tanggal 15/04/2016 pukul 16:25:05.47, tanggal 15/04/2016 pukul 18:55:53 dan pada tanggal 18/04/2016 pukul 11:41:57.

Di samping sesar mendatar, juga dihasilkan pola sesar normal pada *event* tanggal 14/04/2016 pukul 15:03:46. Sesar normal yang terjadi dipengaruhi oleh deformasi batuan di sekitar MTL. Menurut Matsumoto (2016), minimnya tegangan kompresi utama mendominasi di seluruh wilayah. Inilah yang menyebabkan terjadinya gempa yang diakibatkan pola sesar normal di wilayah Kumamoto. Akan tetapi hasil yang didapatkan tidak sesuai dengan milik NIED. Pola sesar normal oleh NIED didapatkan pada *event* tanggal 15/04/2016 pukul 16:45:55, dimana hasil inversi menggunakan ISOLA didapatkan pola sesar *reverse*. sesar *oblique* pada tanggal 14/04/2016 pukul 12:26:34.43 dan tanggal 15/04/2014 pukul 18:03:10.78 juga dihasilkan dalam pengolahan data. Sesar *oblique* merupakan gabungan dari sesar normal dan sesar *strike slip*. Patahan-patahan di Kumamoto cenderung memiliki pola sesar normal dan mendatar. Jika dikorelasikan dengan kondisi geologi yang ada, sesar *oblique* dimungkinkan dapat terjadi pada gempa bumi Kumamoto. Pola sesar lain

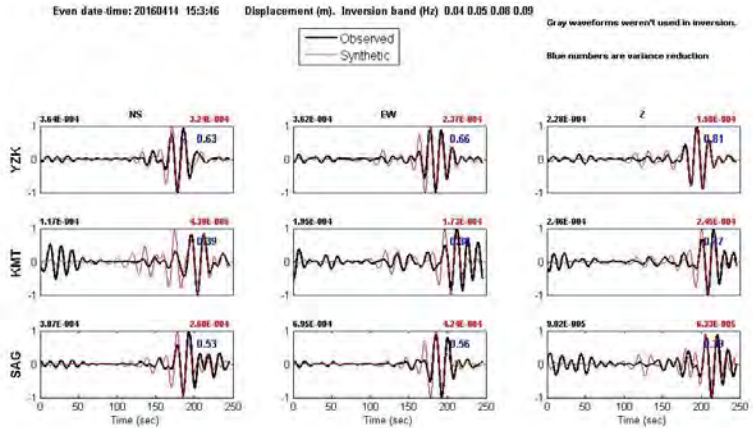
yang dihasilkan dari hasil inversi momen tensor yaitu sesar *reverse* pada *event* gempa tanggal 15/04/2016 pukul 16:45:55.45. hasil ini dapat dikatakan kurang sesuai dengan kondisi geologi yang ada, karena gempa Kumamoto sendiri terjadi akibat *crustal fault*. Gempa yang diakibatkan oleh *reverse fault* umumnya terjadi di zona subduksi lempeng dan memiliki kedalaman yang dangkal hingga menengah.

Dari hasil inversi momen tensor yang telah didapatkan, gempa bumi Kumamoto memiliki kedalaman *centroid* yang dangkal sekitar 5 Km hingga 17 Km. selain itu, waktu *centroid* terpaut selisih beberapa detik dari waktu *origin* gempa. adapun posisi *centroid* menggambarkan lokasi dengan pelepasan momen seismik yang paling tinggi saat gempa terjadi. Sedangkan hasil *slip* maksimum diperoleh pada *event* gempa tanggal 15-04-2016 pukul 16:25:05 dengan magnitudo sebesar 7.3 SR dan *slip* minimum terjadi pada gempa-gempa berkekuatan 5.8 SR. berdasarkan hasil perhitungan *Slip*, diketahui bahwa makin tinggi kekuatan suatu gempa maka pergeseran/*slip* yang ditimbulkan juga semakin besar.

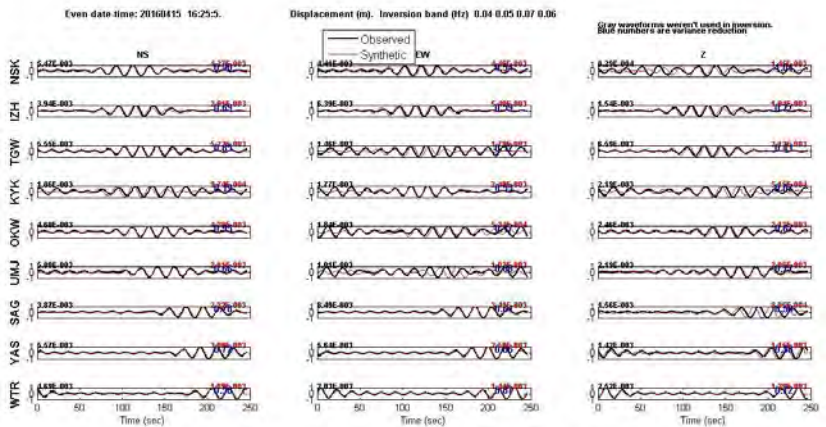
***“halaman ini sengaja dikosongkan”***



### 3. Fitting kurva displacement untuk event gempa pada tanggal 14/04/2016 pukul 15:03:46.45

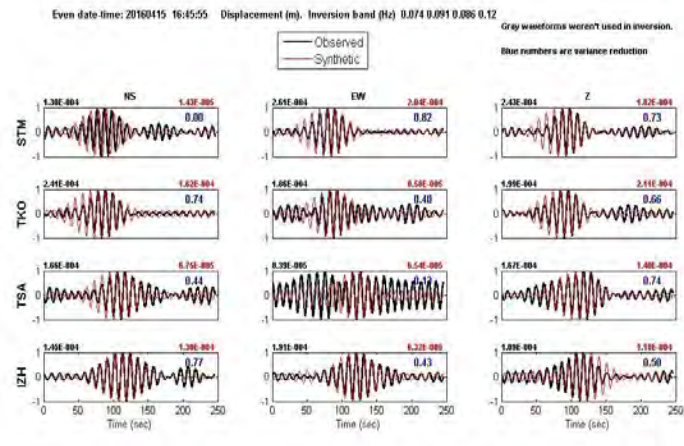


### 4. Fitting kurva displacement untuk event gempa pada tanggal 15/04/2016 pukul 16:25:05.47

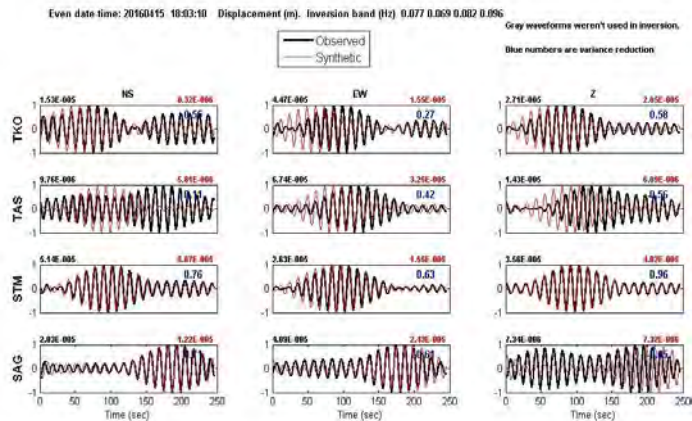




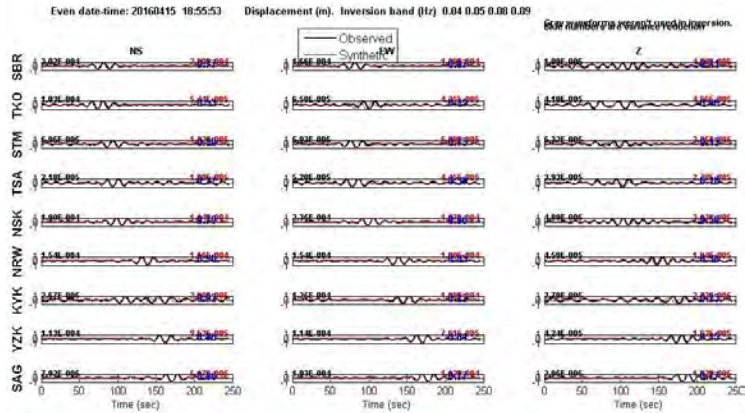
5. Fitting kurva displacement untuk event gempa pada tanggal 15/04/2016 pukul 16:45:55.45



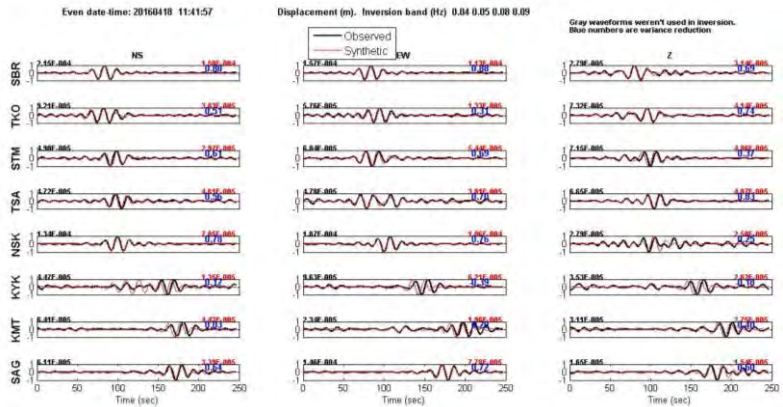
6. Fitting kurva displacement untuk event gempa pada tanggal 15/04/2016 pukul 18:03:10.78



7. Fitting kurva displacement untuk event gempa pada tanggal 15/04/2016 pukul 18:55:53.08

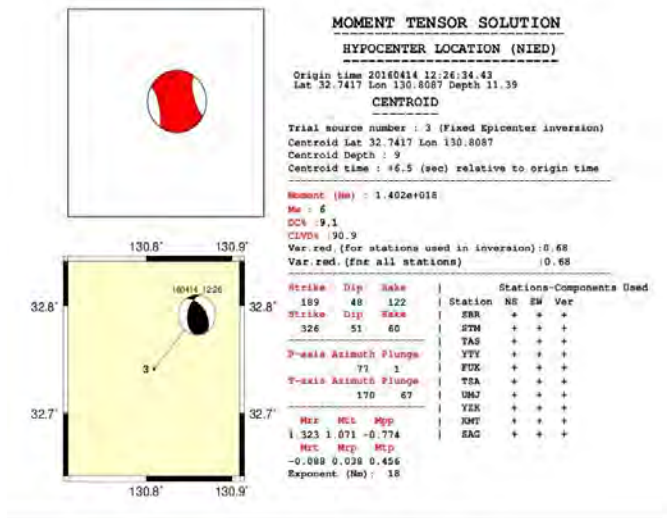


8. Fitting kurva displacement untuk event gempa pada tanggal 18/04/2016 pukul 11:41:57.94

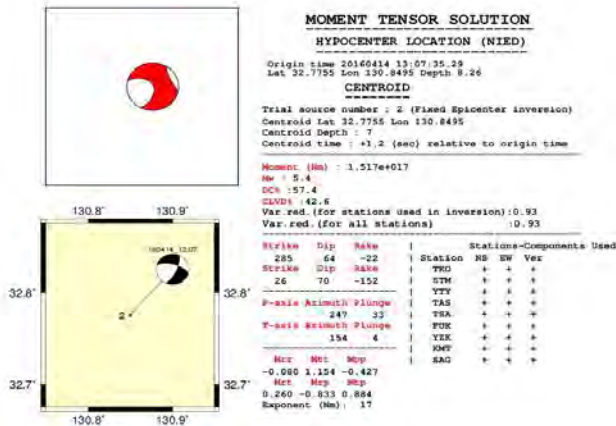


## Lampiran 2 : Hasil inversi momen tensor

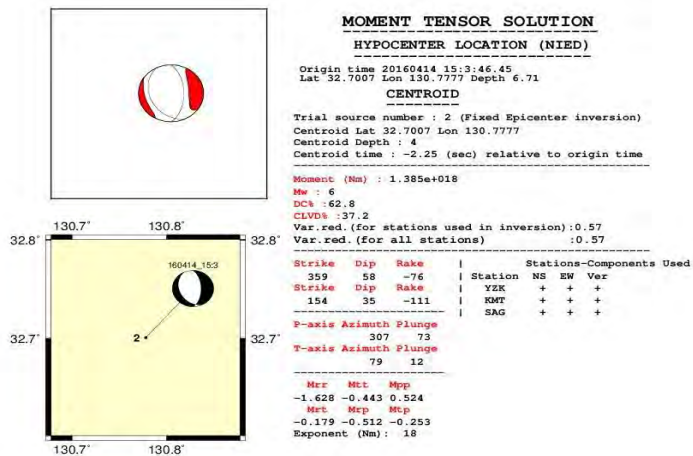
1. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 14/04/2016 pukul 12:26:34.43



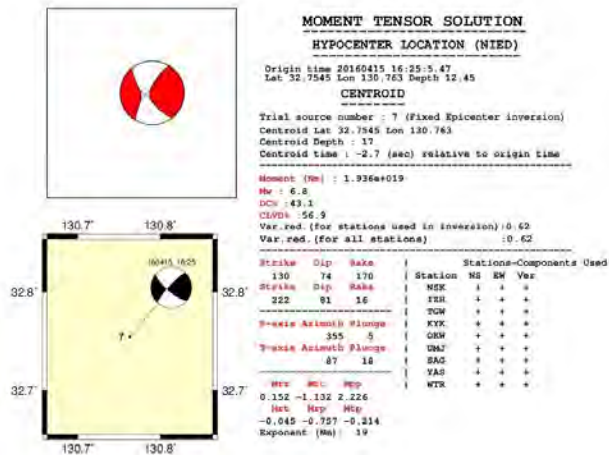
2. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 14/04/2016 pukul 13:07:35.29



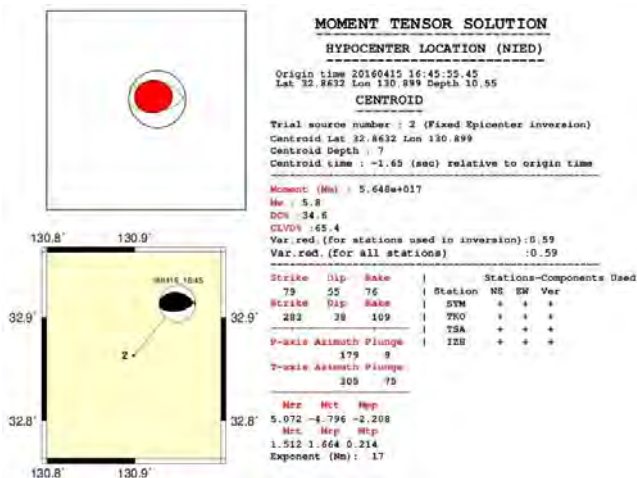
3. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 14/04/2016 pukul 15:03:46.45



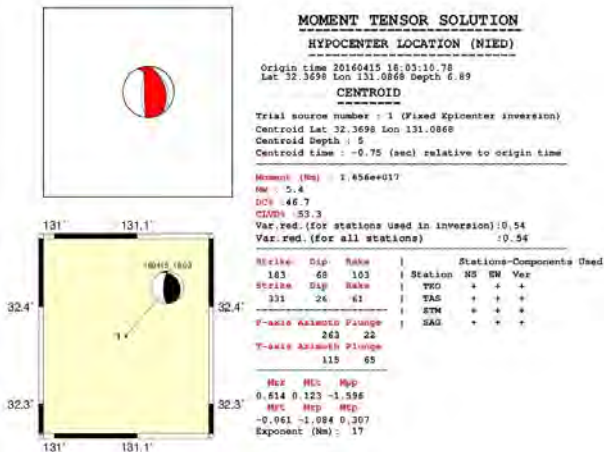
4. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 15/04/2016 pukul 16:25:05.47



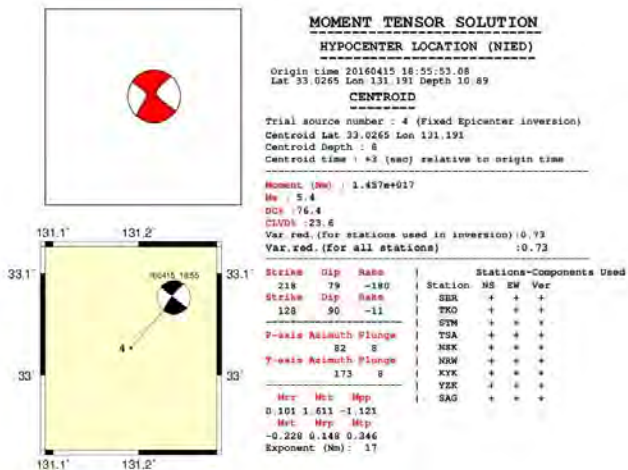
5. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 15/04/2016 pukul 16:45:55.45



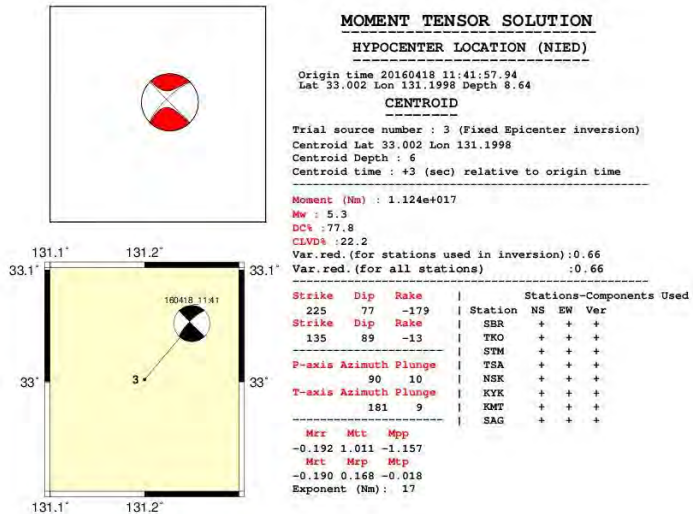
6. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 15/04/2016 pukul 18:03:10.78



7. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 15/04/2016 pukul 18:55:53.08



8. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk *event* gempa pada tanggal 18/04/2016 pukul 11:41:57.94





## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari penelitian yang telah dilakukan didapat kesimpulan sebagai berikut,

1. Besar momen tensor untuk masing-masing komponen dari 8 *event* gempa di Kumamoto Jepang pada tahun 2016 diperoleh hasil sebagai berikut ini,  
 $M_{11} = 0.220 \text{ exp17}$  sampai  $2.226 \text{ exp19}$   
 $M_{22} = 0.122 \text{ exp17}$  sampai  $1.132 \text{ exp19}$   
 $M_{33} = 0.080 \text{ exp17}$  sampai  $0.152 \text{ exp19}$   
 $M_{31} = 0.061 \text{ exp17}$  sampai  $0.045 \text{ exp19}$   
 $M_{32} = 0.148 \text{ exp17}$  sampai  $0.757 \text{ exp19}$   
 $M_{12} = 0.018 \text{ exp17}$  sampai  $0.214 \text{ exp19}$
2. Pola bidang sesar gempa yang terjadi di wilayah Kumamoto Jepang adalah dominasi sesar mendatar (*strike slip fault*), juga dihasilkan sesar normal (*Normal Fault*), sesar naik (*reverse fault*), dan sesar miring (*oblique*).
3. Besar *slip* rata-rata dari *event* gempa di Kumamoto Jepang pada tahun 2016 sebesar 60 meter dengan *slip* minimum 22 meter dan *slip* maksimum 236 meter.

#### **5.2 Saran**

Adapun saran yang bisa diberikan mengenai penulis dalam penelitian ini adalah :

1. perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penentuan momen tensor dan pola bidang sesar dari *focal mechanism* terutama dalam hal proses perhitungan Fungsi *Green*, inversi dan proses *filtering*. Sehingga didapatkan hasil yang lebih bagus dalam *fitting* kurva *displacement* dan mendapatkan hasil solusi *Centroid Moment Tensor*-nya lebih bagus.



2. Perlu penelitian lebih lanjut seperti menghitung durasi *rupture*, tegangan *Coulomb* maupun PGA sebagai upaya mitigasi gempa bumi.
3. Perlu dilakukan penelitian yang lebih mendalam mengenai karakteristik gempa bumi di tiap-tiap daerah untuk mengetahui resiko gempa bumi sedini mungkin.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afnimar .2009. *Seismologi*. Penerbit ITB, Bandung.
- Backus, G.E. and M. Mulcahy. 1976. *Moment tensors and other phemenological description of seismic waves*. I. Continous Displacement. Geophys. J. Roy Astr. Soc., 46, 341-361.
- Bormann, P., Engdahl, B., Kind, R. (2009): *Seismic Wave Propagation and Earth models*. - In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, pp. 1—70.
- Bowler, Sue. 2003. *Bumi yang Gelisah*. Jakarta : Erlangga.
- Dahm, Torsten., Frank Krüger. 2014. *Moment Tensor Inversion and Moment Tensor Interpretation*. DOI:10.2312/GFZ.NMSOP-2\_IS\_3.9
- Gilbert, F. 1970. *Excitation of the Normal Modes of the Earth by Earthquakes Sources*. Geophys. J. Roy Astr. Soc., 22, 223-226.
- Grandis, H. (2009), *Pengantar pemodelan inversi geofisika*, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- Hamilton,W. 1979. *Earthquake Map of the Indonesia Region*. Misc. Invest Ser. Map I-875-C.U.S. Geology Survey. Denver, Colo.
- Hasan, M. Mifta. 2014. *Analisa Pola Bidang Sesar pada Zona Subduksi di Wilayah Sumatera Barat dari Event Gempa pada Tahun 2013*. Tugas Akhir Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya.
- Heki, K., Miyazaki, S., Takahashi, H., Kasahara, M., Kimata, F., Miura, S., Vasilenko, N., F., Ivashchenko, and Ki-Dok, A., 1999, The Amurian plate motion and current

- plate kinematics in eastern Asia: *Journal of Geophysical Research*, v. 104, p. 29,147-29,155.
- Kikuchi, M., Kanamori, H., 1991. *Inversion of Complex Body Wave-III*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 2335-2350.
- Kubo, A., E. Fukuyama, H. Kawai, K. Nonomura, 2002, *NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application*, *Tectonophysics*, 356, 23-48
- Lay, T. and Wallace, Terry C., 1995, *Modern Global Seismology*, Academic Press, New York, USA.
- Madlazim. 2011. *Estimasi CMT, Bidang Sesar dan Durasi Rupture Gempa Bumi di Sumatera serta Kmeungkinan Peringatan Dini Tsunami*.
- Mahardika, Depta. 2014. *Estimasi Momen Tensor, Pola Bidang Sesar dan Mekanisme Fokus Gempa Tohoku-Oki Jepang pada Tahun 2011 dengan Memanfaatkan Inversi Waveform Tiga Komponen Menggunakan Program ISOLA*. Surabaya. Tugas Akhir Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya.
- Masykur, M. Romli. 2011. *Analisis Inversi Waveform Tiga Komponen Untuk menentukan Pola Bidang Sesar Gempa Bumi di Daerah Jawa Barat*. Surabaya. Tesis Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya.
- Matsumoto, Satoshi et al., 2015, *Spatial Heterogeneities in Tectonic Stress in Kyushu, Japan and Their Relation to a Major Shear Zone*. *Journal of Earth, Planets and Space*. DOI 10.1186/s40623-015-0342-8
- Matsumoto, Satoshi et al., 2016, *Focal Mechanism of 2016 Kumamoto Earthquake Activity and its Relation to the Stress Field (Preliminary Report)*, Japan Geoscience Union Meeting 2016.

- Menke, W. (1993), *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*, Academic Press, New York, USA.
- Okal, Emile. 2011. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. DOI: 10.1007/978-90-481-8702-7.
- Papazachos, Scordilis E.M Panagiotopoulos and Karakaisis G.F. 2004. *Global Relations Between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquake*. Bulletin of the Geological Society of Greece Vol. XXXVI.
- Setyowidodo, Irwan, Bagus Jaya Santosa. *Analisis Seismogram Tiga Komponen Terhadap Momen Tensor Gempa Bumi di Manokwari Papua 03 Januari 2009*. Jurnal Neutrino (2011) April Vol.3, No.2
- Shearer, P. M., 1999. *Introduction to Seismology*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Shearer, Peter M. 2010. *Introduction to Seismology : The Wave Equation and Body Waves*. University of California, San Diego.
- Silver, E.1981. *A New Tectonic Map of Eastern Indonesia, in Geology and Tectonics of Eastern Indonesia*. Edited by J.Barber and S.Wirosujono.p.343-347.Geological Research and Development Center.Bandung,Indonesia.
- Sokos, and Zahradnik, J., 2008, *ISOLA a Fortran Code and a Matlab GUI to Perform Multiple-Point Source Inversion of Seismic Data*. Computers and Geosciences 34, 967-977.
- Sokos, E. N., Zahrandik, J., 2009. *A Matlab GUI for use with ISOLA Fortran codes*. User's Guide.
- Stein, S., and Wysession, M. (2003). *An introduction to seismology, earthquakes and Earth structure*. Blackwell Publishing, Oxford

- Taira, Asahiko. 2001. *Tectonic Evolution of The Japanese Island Arc System*. Annual Reviews Earth Planet Science 2001 29:109-34.
- UCL. Earthquake Source Mechanics. *Lecture 5: Earthquake Focal Mechanism*. GNH7/GG09/GEOL4002 Earthquake Seismology And Earthquake Hazard
- Udias A., et.al. 2014. *Source Mechanism of Earthquakes*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Wei, D., and Seno, T., 1998, Determination of the Amurian plate motion: American Geophysical Union, Geodynamics series, v. 27, p. 337-346.
- Yoshida, T. 1995. *Waveform Inversion Methods for the Earthquake Source*. J. Phys. Earth, 43, 183-209.
- Zahradnik, J., Gallovic F., E. Sokos, A. Serpetsidaki and G.A. Tselentis., 2008, *Quick Fault Plane Identification by a Geometrical Method: Application to the Mw 6.2 Leonido Earthquake*, 6 January 2008, Greece. Seismological Research Letters Volume 79, Number 5, September/October 2008, 653-662
- Zahradnik, J., Serpetsidaki A., Sokos E. and Tselentis G.A., 2006, *Iterative deconvolution of regional waveforms and a double-event interpretation of the lefkada earthquake*, Greece.
- Zhao, Dapen. 2012. *Mechanism of The 2011 Tohoku-Okii Earthquake : Insight From Seismic Tomography. Proceeding of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*. Jepang.



## **BIODATA PENULIS**

Penulis bernama lengkap Zumrotus Saadah Abaz merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis berasal dari desa Kauman Kecamatan Sidayu Kabupaten Gresik yang lahir pada tanggal 11 Mei 1995 dari pasangan Abdul Bari dan Mas'udah. penulis telah menempuh pendidikan formal diantaranya MI Islamiyah Sidayu, MTs Kanjeng Sepuh Sidayu dan MA Kanjeng Sepuh Sidayu. Setelah lulus dari MA Kanjeng Sepuh pada tahun 2012, penulis mengikuti jalur tes tulis dengan beasiswa bidikmisi dan diterima di jurusan Fisika ITS pada tahun 2012 dan terdaftar dengan NRP 1112100049. Selama menjadi mahasiswa Fisika ITS penulis aktif dalam mengikuti organisasi baik jurusan maupun Institut, diantaranya staff departemen perekonomian HIMASIKA ITS periode 2013/2015, menjadi sekretaris departemen perekonomian HIMASIKA ITS periode 2014/2015, serta menjadi staff organisasi Mahagana ITS selama 2 periode yakni pada tahun 2013-2014 dan 2014-2015. Selain itu, penulis juga menjadi asisten laboratorium fisika dasar, serta asisten mata kuliah fisika dasar I dan II.